



دانشگاه فنی و حرفه‌ای

مجله علم فناوری و مهندسی

دو فصلنامه علمی

پاییز و زمستان، ۱۴۰۱

سر دبیر: دکتر محمود شریعتی

مدیر مسئول: دکتر محسن حداد سبزواری

صاحب امتیاز: دانشگاه فنی و حرفه ای

هیئت تحریریه:

دکتر اصغر برادران رحیمی

استاد، دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده مهندسی مکانیک

دکتر محمد جواد مغربی

استاد، دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده مهندسی مکانیک

دکتر محمود موسوی مشهدی

استاد، دانشگاه تهران، دانشکده مهندسی مکانیک

دکتر اکبر جعفری

دانشیار، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، گروه مهندسی مکانیک

دکتر اسماعیل لگزیان

دانشیار، دانشگاه حکیم سبزواری، دانشکده مهندسی مکانیک

دکتر علیرضا فتحی

دانشیار، دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده مهندسی مکانیک

دکتر کریم علی اکبری

دانشیار، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، گروه مهندسی مکانیک

دکتر مجتبی معصوم نژاد

دانشیار، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، گروه مهندسی مکانیک

مدیر داخلی نشریه: دکتر طیبه جلالی

کارشناس نشریه: مهندس حمیده سادات سیدحسینی ویراستار و صفحه آرایی: نشر متخصصان

نشانی: مشهد- بلوار پیروزی - میدان شهید کاوه - دانشکده فنی شهید منتظری - دفتر نشریه -

صندوق پستی: ۹۴۵۹۴-۹۱۷۶۹

دورنگار: ۰۵۱-۳۸۷۸۴۰۴۶

تلفن: ۰۵۱-۳۸۷۰۹۴۳۳

وب سایت: <http://stmechanics.bmtc.ac.ir>

پست الکترونیکی: amej@tvu.ac.ir

فهرست مطالب

افزایش پایداری نانوسیالات و روش های تخمین آن.....	۷
تحلیل عددی اندرکنش سیال خون در رگ بادیوارهی انعطاف پذیر.....	۲۰
مطالعه ی عددی المان گسسته در شناسایی اثر متغیرهای محرک ارتعاشی بر رفع گرفتگی و تخلیه ی سیلوی حاوی مواد دانه ای	۳۹
مدل سازی و بررسی رفتار DNA اوربگامی مثلثی تحت تأثیر دمای آزمایشگاهی.....	۵۸
تحلیل خرابی میل بادامک موتور خودروسواری شش سیلندر.....	۷۰
بررسی تأثیر پارامترهای فرآیندی بر شکل دهی با گاز لوله ی آلومینیومی AA ۶۰۶۳ در دمای داغ با استفاده از روش سطح پاسخ	۸۳
اثر دبی سیال گرم و نانولوله ی کربنی - آب بر عملکرد نانوسیال در تبادل گر حرارتی صفحه ای و اشردار	۱۰۰
مطالعه ی عددی و بررسی تأثیر میدان مغناطیسی بر سرعت و افت فشار سیال هیدرودینامیک مغناطیسی دریلنکت.....	۱۱۳
بررسی عددی و آزمایشگاهی سیستم نوین سرمایش ساختمان مبتنی بر سیکل تبرید تراکمی	۱۲۶
بررسی تجربی تأثیر یک ریات پوشیدنی در تعادل انسان به هنگام ایستادن و راه رفتن	۱۳۸

افزایش پایداری نانوسیالات و روش‌های تخمین آن

بهمن رحمتی نژاد^{۱*}، فرزین عظیم‌پور شیشوان^۲

۱- مربی؛ گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تهران، ایران.

۲- استادیار؛ گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تهران، ایران.

چکیده

نانوذرات موادی هستند که حداقل یکی از ابعادشان (طول، عرض، ارتفاع) در مقیاس نانو (بین ۱ تا ۱۰۰ نانومتر) باشد. نانوسیالات از توزیع ذرات با ابعاد نانو در سیالات معمولی حاصل می‌شوند. سیالات راجع، نظیر آب، روغن‌ها و اتیلن گلیکول که معمولاً در انتقال حرارت مورد استفاده قرار می‌گیرند و توانایی محدودی از لحاظ خواص حرارتی دارند. خواص جالب نانوسیالات (مانند ضریب انتقال حرارت بالا) و پتانسیل زیادی که برای افزایش انتقال حرارت از خود نشان می‌دهند، سبب شده که این گروه از سیالات در سال‌های اخیر در کانون توجه محققان قرار گیرند. یکی از فاکتورهای کلیدی در بهینه‌شدن خواص این دسته از سیالات مسئله‌ی پایداری آن‌هاست. اجتماع ذرات و کلوخه‌شدن آن‌ها باعث افزایش احتمال ته‌نشینی می‌شود، پایداری سوسپانسیون را کاهش می‌دهد و موجب از بین رفتن ویژگی‌های سوسپانسیون، از جمله هدایت حرارتی، ویسکوزیته و افزایش ظرفیت حرارتی می‌شود. در این تحقیق، روش‌های افزایش پایداری و ابزارهای بازرسی بررسی شد. نتایج نشان داد که استفاده‌ی همزمان از ارتعاش مافوق صوت و مواد فعال‌کننده‌ی سطح (سورفکتانت) تأثیر بسزایی در پایداری نانوسیالات دارد و دو روش استفاده از پراکنش نور DLS و روش طیف‌سنجی جذبی فرابنفش - مرئی به‌منظور بررسی پایداری توسط محققین زیادی در تحقیقات خود مورد استفاده قرار گرفته است.

کلمات کلیدی

نانوسیالات، نانوذرات، پایداری نانوسیالات، تخمین پایداری نانوسیالات

Increasing the stability of nanofluids and its estimation methods

Bahman Rahmatinejad^{1*}, Farzin Azimpour²

1- PhD, Department of Mechanical Engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran.

2- Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran.

Abstract

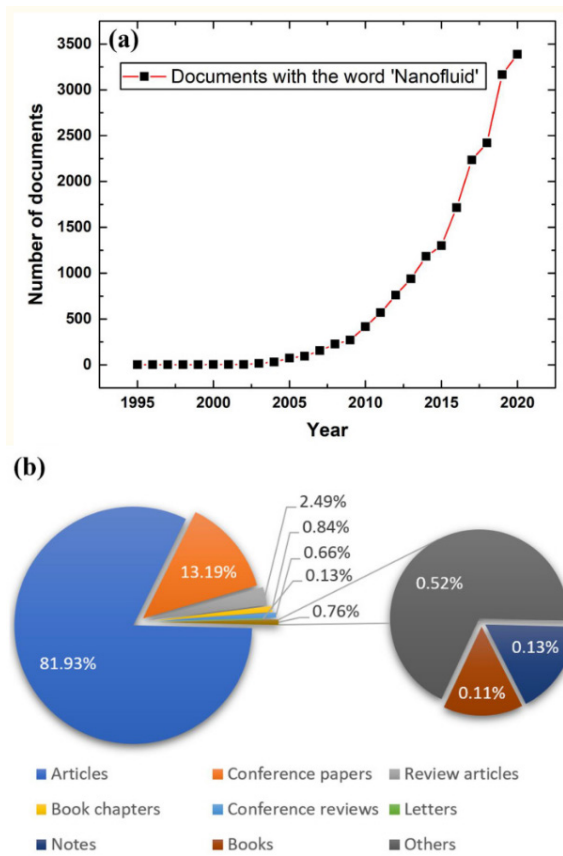
Nanoparticles are materials which have at least one of their dimensions (length, width, height) at the nano scale (among 1 and 100 nm). Nanofluids are obtained from the distribution of particles with nano dimensions in normal fluids. Common fluids such as water, oils and ethylene glycol, which are usually used in heat transfer, have limited ability in terms of thermal properties. The interesting properties of nanofluids (such as high heat transfer coefficient) and the great potential they show for increasing heat transfer have caused this group of fluids to be in the focus of researchers' attention in recent years. One of the key factors in optimizing the properties of these fluids is their stability. The gathering of particles and their agglomeration increases the possibility of sedimentation, reduces the stability of the suspension, and causes the loss of the properties of the suspension, such as thermal conductivity, viscosity, and increase in heat capacity. In this research, methods of increasing stability and inspection tools were investigated. The results showed that the simultaneous use of ultrasonic vibration and surface activating substances (surfactant) has a significant effect on the stability of nanofluid. And two methods of using DLS light scattering and ultraviolet-visible absorption spectrometry have been used by many researchers in their research in order to check stability.

Keywords

Nanofluid, nanoparticles, nanofluid stability, estimation of nanofluid stability

۱- مقدمه

برای سیال‌های واسط انتقال حرارت متداول باشند و به عنوان نسل بعدی سیالات انتقال حرارت مورد استفاده قرار گیرند. لذا مطالعات تجربی و عددی زیادی جهت بررسی رفتار حرارتی و هیدرودینامیکی این سیالات در سیستم‌های حرارتی مختلف انجام گرفته است. خواص جالب نانوسیال‌ها (مانند ضریب انتقال حرارت بالا) و پتانسیل زیادی که برای افزایش انتقال حرارت از خود نشان می‌دهند، سبب شده که این گروه از سیالات در سال‌های اخیر در کانون توجه محققان قرار گیرند [۳ و ۴]. با پیشرفت روزافزون فناوری نانو و گسترش شاخه‌های کاربرد این فناوری در علوم مختلف، اخیراً استفاده از نانوسیالات به عنوان راهبردی جدید در عملیات انتقال حرارت مطرح شده و تحقیقات زیادی در این خصوص انجام شده است.



شکل ۱: نتیجه‌ی جستجو از پایگاه Scopus در مورد نانوسیالات که در آن (a) تعداد آثار منتشر شده در سال را نشان می‌دهد و (b) درصد هر نوع از این اسناد را نشان می‌دهد [۵]

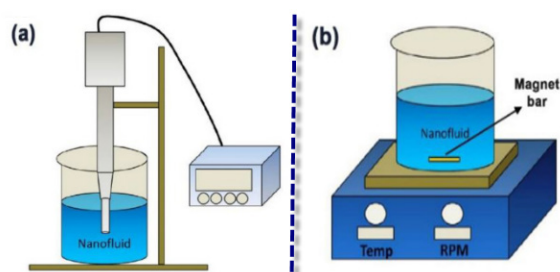
بهینه‌سازی و افزایش بازده سیستم‌های انتقال حرارت یکی از اساسی‌ترین چالش‌های مهندسان و طراحان طی سالیان اخیر بوده است [۱]. سیالات رایج، نظیر آب، روغن‌ها و اتیلن گلیکول که معمولاً به عنوان واسط انتقال حرارت مورد استفاده قرار می‌گیرند، توانایی محدودی از لحاظ خواص حرارتی دارند که اولین مانع برای فشرده کردن و بالا بردن راندمان مبدل‌های حرارتی می‌باشد [۲]. یکی از روش‌های بهبود انتقال حرارت افزودن نانوذرات فلزی، مانند Al_2O_3 و CuO و ... به سیال پایه‌ی آب و مخلوط اتیلن گلیکول است. این روش در مورد سیالاتی که از ذرات با اندازه‌ی میلی‌متر یا میکرومتر استفاده می‌کنند، به دلیل پایداری کم، ته‌نشینی سریع، ایجاد انسداد و گرفتگی مسیر جریان، ایجاد سایش و فرسایش سریع دیواره‌ی لوله و تجهیزات و افزایش شدید افت فشار در جریان سیال مورد استقبال قرار نگرفت. در سال ۱۹۹۵ میلادی، چوی گونه‌ی جدیدی از سیال با نام سیال نانو را معرفی کرد که از یک سیال پایه که حاوی ذرات جامد در اندازه‌ی نانو با ضریب رسانایی بالا و نسبت حجمی کم بود، تشکیل شده بود [۳]. تحقیقات نشان داد که نانوسیال‌ها رفتار کاملاً متفاوتی نسبت به مخلوط سیال‌های رایج با ذرات میلی‌متری و میکرومتری دارند. در مقایسه با مخلوط‌های شامل ذرات معلق میلی‌متری و میکرومتری، مخلوط شامل ذرات نانومتری، پایداری و خواص جریانی بهتری را از خود نشان می‌دهند [۲]. همچنین ضریب انتقال حرارت هدایتی بسیار بالاتری را هم نشان می‌دهند و درعین حال افت فشار خاصی هم دیده نمی‌شود؛ به این ترتیب شاخه‌ی جدیدی در علوم مهندسی حرارتی ایجاد شده و به نظر می‌رسد که سیالات نانو به دلیل قابلیت مناسب در افزایش انتقال حرارت، جایگزین مناسبی

شکل ۲ اثر خوشه‌شدن و درصد حجمی را بر روی ضریب هدایت حرارتی نشان می‌دهد. مشخص است که با افزایش درصد حجمی نانوذرات احتمال خوشه‌شدن وجود دارد و همچنین هر چقدر نانوذرات به‌صورت خوشه‌ای تبدیل شوند، ضریب هدایت حرارتی کاهش پیدا خواهد کرد. برای افزایش پایداری در نانوسیالات می‌توان از روش‌های ارائه‌شده در ادامه استفاده کرد.

۲-۱- استفاده از همزن برقی و تکان‌دهنده‌ی

مغناطیسی

بی‌شک اولین و ساده‌ترین روش جهت مخلوط‌کردن نانوسیال استفاده از همزن برقی می‌باشد. برای حفظ پایداری بیشتر می‌توان بعد از استفاده از همزن برقی، از تکان‌دهنده‌ی مغناطیسی نیز استفاده کرد. رحمتی‌نژاد و همکاران برای تهیه‌ی نانوسیال از یک همزن برقی با قابلیت تنظیم دور از ۲۰۰ تا ۳۰۰۰ دور در دقیقه استفاده کردند و سپس از یک تکان‌دهنده‌ی مغناطیسی با سرعت ۱۰۰ تا ۲۰۰۰ دور در دقیقه و قدرت گرمایش ۴۰۰W استفاده کردند [۷].



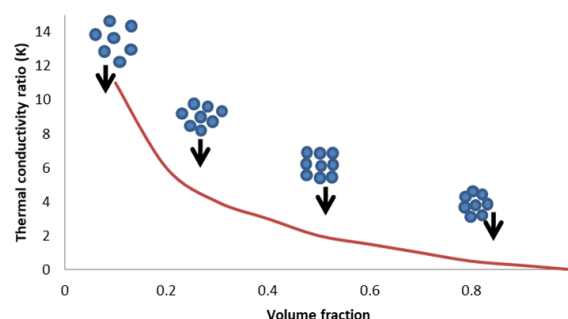
شکل ۳: (a) همزن برقی (b) تکان‌دهنده‌ی مغناطیسی [۸]

با توجه به شکل ۴ می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از همزن برقی و سپس تکان‌دهنده‌ی مغناطیسی جهت مخلوط‌کردن نانوسیال، باعث پایداری بیشتر نانوسیال می‌شود. به‌طوری‌که بدون اضافه‌کردن هیچ تثبیت‌کننده‌ای تا ساعت‌ها می‌توان نانوسیال را پایدار نگاه داشت.

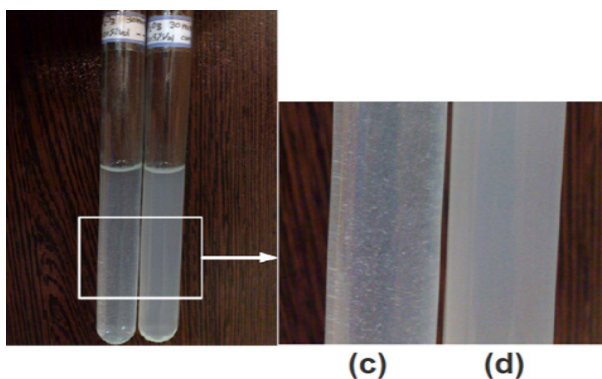
اما مشکل عمده‌ی این سیالات بحث پایداری بلندمدت آنان می‌باشد که کاربرد آن‌ها را در مصارف صنعتی با محدودیت مواجه کرده است. در این تحقیق، روش‌های افزایش پایداری و همچنین روش‌های کنترل پایداری مورد بحث قرار گرفته است. با توجه به عدم وجود مطالعات مشابه به‌صورت جامع در این خصوص، و از طرفی ارائه‌ی نتایج ضد و نقیض توسط پژوهشگران در این مورد باعث شد این تحقیق انجام شود.

۲- روش‌های افزایش پایداری نانوسیالات-

تهیه‌ی سوسپانسیون یک‌نواخت و پایدار تأثیر بسزایی در بهبود خواص حرارتی نانوسیال دارد. یکی از مواردی که بر پایداری نانوسیال تأثیر می‌گذارد، پدیده‌ی تشکیل خوشه یا تجمع ذرات می‌باشد که باعث ته‌نشینی این ذرات می‌شود. پدیده‌ی خوشه‌شدن از دو جهت ممکن است اثر منفی روی نانوسیال داشته باشد. این پدیده با ایجاد توده‌های بزرگ ممکن است باعث عدم پایداری سوسپانسیون شود و همچنین با ایجاد نواحی خالی از ذرات نانو در مایع و بالا رفتن مقاومت گرمایی، باعث کاهش انتقال گرما شود. این موضوع در (شکل ۲) نشان داده شده است.



شکل ۲: اثر خوشه‌شدن و درصد حجمی بر روی ضریب هدایت حرارتی [۶]



شکل ۵: تصویر SEM از نانوذرات $AlPO_4$ بعد از (a) ۳۰ min
اولتراسونیک مداوم، (b) اولتراسونیک ناپیوسته، (c) نمونه‌ی در
معرض اولتراسونیک ناپیوسته، (d) نمونه‌ی در معرض اولتراسونیک
پیوسته [۱۰]

با توجه به شکل ۵ مشخص است که استفاده از اولتراسونیک
پیوسته باعث سوسپانسیون بهتر می‌شود. به‌طوری‌که
در شکل ۵- (c)، به‌علت استفاده‌ی ناپیوسته از دستگاه
اولتراسونیک شاهد خوشه‌ای شدن نانوذرات هستیم.

۲-۳- افزودن موارد فعال کننده‌ی سطح (سورفکتانت)

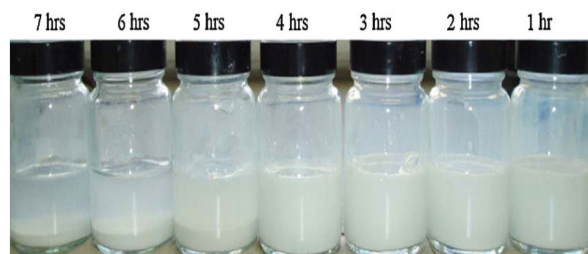
افزودن ماده‌ی فعال سطحی در نانوسیال روشی ساده و
مقرون‌به‌صرفه برای افزایش پایداری نانوسیال است. مواد
فعال سطحی به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای بر مشخصه‌ی سطح
سیستم اثر می‌گذارند. این مواد حاوی یک سر قطبی
آبدوست و یک سر آب‌گریز هستند. مواد فعال سطحی را
بر اساس ترکیب سر آبدوست به چهار دسته تقسیم‌بندی
می‌کنند:

الف: غیریونی که ی گروه باردار در سر آبدوست وجود ندارد.

ب: آنیونی با گروه باردار منفی.

ج: کاتیونی با گروه باردار مثبت.

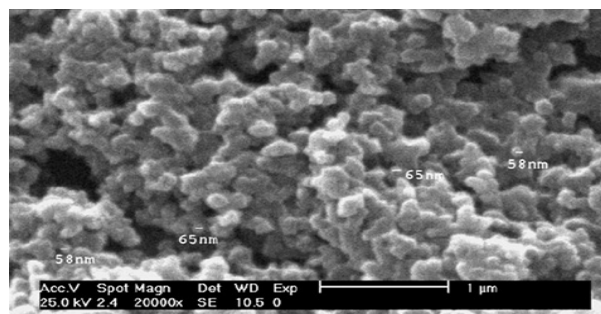
د: آمفوتر (دوخصلتی) که بار سر آبدوست می‌تواند
مثبت یا منفی باشد.



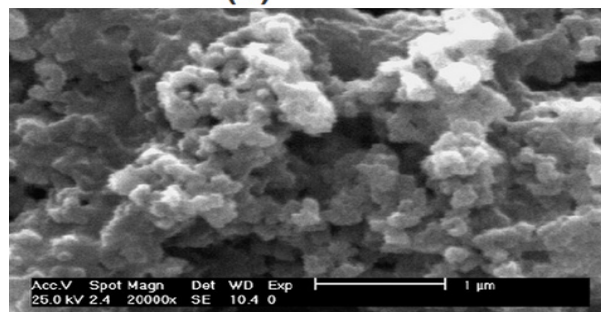
شکل ۴: آزمایش پایداری نانوسیال $AlPO_4$ نسبت به زمان (بدون
اضافه کردن هیچ تثبیت کننده‌ای) [۹]

۲-۲- استفاده از ارتعاش مافوق صوت

به‌منظور افزایش پایداری نانوسیال می‌توان از لرزاننده‌های
فراصوت استفاده کرد. در این روش، امواج فراصوت سبب
از بین رفتن پیوندهای سطحی ضعیف میان نانوذرات
شده و در نتیجه پایداری نانوسیال را افزایش می‌دهند. این
روش در مقایسه با سایر روش‌ها، ازجمله مغناطیسی و
همزن برقی مفیدتر است؛ بنابراین توسط محققان زیادی
مورد استفاده قرار می‌گیرد.



(a)

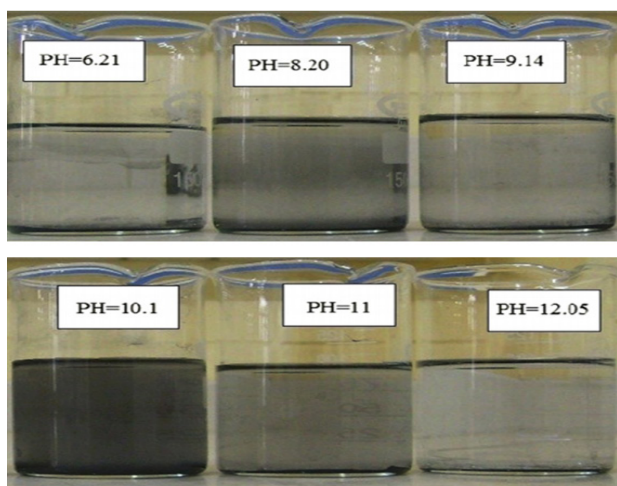


(b)

دودسیل سولفات به عنوان سورفکتانت، حتی پس از ۱۰ روز پایداری خود را حفظ کرده است. رحمتی‌نژاد در تحقیق خود به منظور حفظ پایداری محلول، برای اینکه برای کارهای مهندسی مناسب باشد، از ۱٪ وزنی مواد فعال‌کننده‌ی سطحی (سدیم دودسیل بنزن سولفونات) در نانوسیال Al_2O_3 استفاده کرد [۱۴].

۲-۴- تغییر اسیدیته

پایداری یک نانوسیال ارتباط مستقیمی با خواص الکتروستاتیکی آن دارد. به این صورت که اگر در سطح نانوذرات چگالی بار زیاد باشد، به علت نیروی دافعه الکترواستاتیکی، نانوذرات در سیال پایدار خواهند بود؛ بنابراین می‌توان با تنظیم PH نانوسیال، به پایداری مطلوب رسید (شکل ۷) [۱۱].

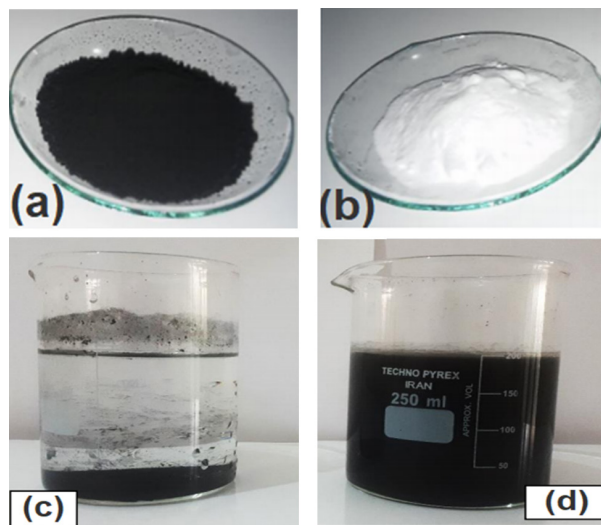


شکل ۷: بررسی تأثیر PH‌های مختلف بر پایداری نانوسیال اکسید مس [۱۵]

۳- ابزارهای بازرسی پایداری نانوسیالات

اصلی‌ترین عیب نانوسیالات که کاربردشان را محدود کرده است، عدم تمایل به پراکندگی همگن در فاز مایع است؛ از این رو بحث پایداری نانوسیالات اهمیت بالایی دارد.

برای انتخاب ماده‌ی فعال سطحی مناسب، باید به این نکته توجه کرد که اگر سیال پایه قطبی باشد، از مواد فعال سطحی با سر آب‌دوست و در غیر این صورت، از مواد فعال سطحی‌ای که در روغن محلول هستند، استفاده می‌شود [۱۱]. همچنین در استفاده از این مواد باید دقت کرد؛ زیرا حضور بیش از حد این مواد در نانوسیال خصوصیات نانوسیال را تغییر داده و بر انتقال حرارت اثر می‌گذارد. اگرچه استفاده از مواد فعال سطحی یکی از راه‌های معمول بهبود پایداری نانوسیال است، اما افزودن این مواد به نانوسیال ممکن است سبب بروز مشکلاتی، چون ایجاد کف و کاهش ضریب هدایت حرارتی نانوسیال شود. همچنین با تخریب پیوند بین ماده‌ی فعال سطحی و نانوذره در دماهای بالای ۶۰ درجه‌ی سانتی‌گراد، پایداری نانوسیال از بین می‌رود [۱۲].



شکل ۸: (a) نانوکربن، (b) سدیم دودسیل سولفات، (c) نانوسیال کربن بدون سورفکتانت، (d) نانوسیال کربن با سورفکتانت [۱۳]

شکل ۹ تفاوت در ته‌نشینی نانوسیال با سورفکتانت و بدون سورفکتانت را نشان می‌دهد. نانوسیال بدون سورفکتانت پس از گذشت مدت زمان حدود ۶ ساعت به طور کامل ته‌نشین شده است، در حالی که نانوسیال حاوی سدیم

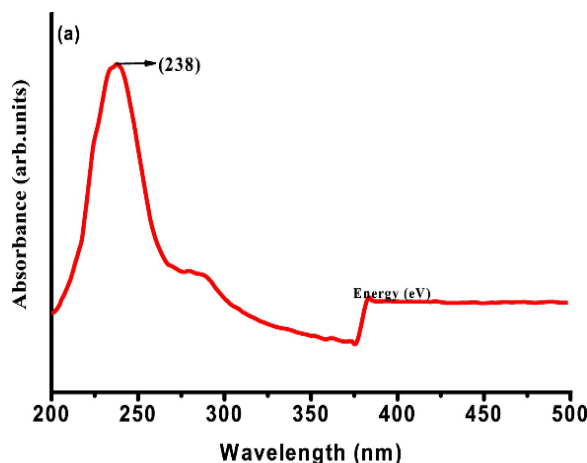
۳-۲- اعمال میدان خارجی و ته‌نشینی

در این روش، مقدار وزن یا حجم رسوب نانوذرات در نانوسیال تحت نیروی میدان خارجی گرانشی یا سانتریفیوژ، معیاری از پایداری نانوسیال است. به این صورت که هرچقدر مقدار بیشتری از نانوذره رسوب کند، نانوسیال پایداری کمتری دارد.

۳-۳- طیف‌سنجی جذبی فرابنفش - مرئی

(UV-Vis spectrophotometry)

این روش یکی از روش‌های آسان بررسی پایداری نانوسیال است. تغییرات غلظت ذرات شناور در نانوسیال، برحسب زمان از طریق اندازه‌گیری جذب نانوسیالات به‌دست می‌آید؛ چراکه به‌طور کلی یک رابطه‌ی خطی بین شدت جذب و غلظت نانوذرات در سیال وجود دارد. اساس طیف‌بینی جذبی فرابنفش - مرئی، اندازه‌گیری میزان جذب یک پرتو نوری در محدوده‌ی طیفی ناحیه‌ی مرئی از طول موج (۳۸۰-۲۰۰ nm) و فرابنفش (۷۷۰-۳۸۰ nm) با عبور از درون یک نمونه یا بعد از انعکاس از سطح یک نمونه است. عیب این روش این است که برای نانوسیالات با غلظت بالا مناسب نیست (شکل ۹).

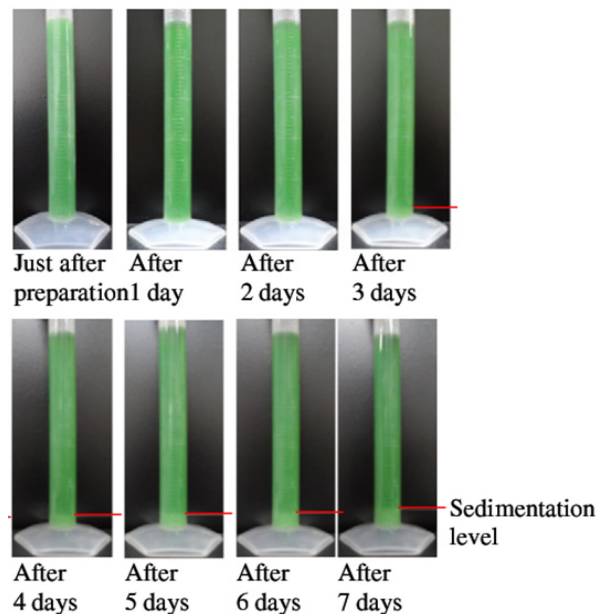


شکل ۹: طیف فرابنفش نانوذرات Al_2O_3 [۱۸]

برای تخمین دقیق پایداری نسبی نانوسیال، به استفاده از چند روش نیاز است و نباید به یکی از این روش‌ها اکتفا کرد که در ادامه چند مورد از این روش‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۳-۱- عکس‌برداری از رسوب

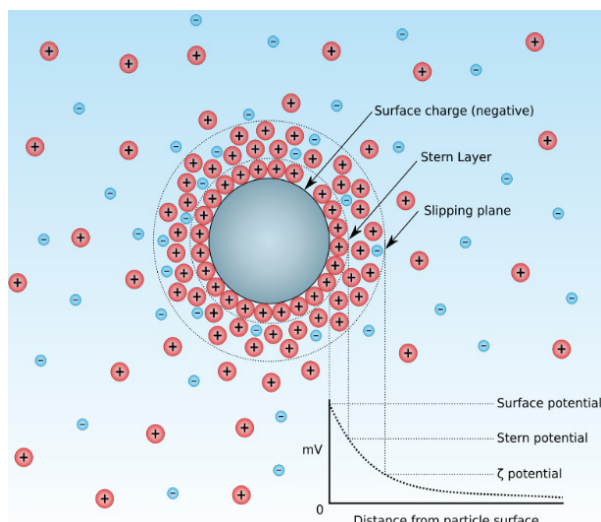
یکی از ساده‌ترین روش‌های بازرسی پایداری نانوسیالات عکس‌برداری از رسوب است. در این روش، پس از آماده‌شدن سوسپانسیون، از آن طی زمان‌های مختلف عکس گرفته می‌شود و میزان رسوب مشخص می‌شود (شکل ۸).



شکل ۸: بررسی سطح رسوب‌گذاری نانوسیال Al_2O_3 با گذشت زمان [۱۶]

رحمتی‌نژاد و همکاران برای بررسی زمان ته‌نشینی، آزمایش عکس‌برداری از رسوب را برای Al_2O_3 و CuO انجام دادند. نتایج آن‌ها نشان از پایداری Al_2O_3 در ۲۲ روز و CuO در ۲۰ روز اول داشت [۱۷].

است؛ این فاصله را در اصطلاح، فاصله‌ی هیدرودینامیکی می‌نامند و پتانسیلی را که در این فاصله وجود دارد به نام پتانسیل زتا می‌شناسند (شکل ۱۰).



شکل ۱۰: اثر پتانسیل زتا [۲۰]

یکی از مهم‌ترین روش‌های یافتن کیفیت پایداری نانوسیال از طریق رفتار الکتروفوریتیک (حرکت ذرات یک محلول کلئیدی بر اثر جریان الکتریسیته) آن است. بر اساس یک تئوری پایداری، اگر پتانسیل زتا دارای مقدار مطلق بالایی باشد، دافعه‌ی الکترواستاتیک بین ذرات افزایش می‌یابد که این منجر به پایداری خوب سوسپانسیون می‌شود. ذراتی که بار سطحی بالایی دارند، تمایلی به تشکیل خوشه ندارند. معمولاً سوسپانسیون‌های با مقدار مطلق پتانسیل زتای بالای ۳۰ mV از لحاظ پایداری سوسپانسیون خوبی به‌شمار می‌روند (جدول ۱). مشکل این روش این است که آنالیزهای آن برای ویسکوزیته‌ی سیال مبنا محدودیت‌هایی دارد [۲۰].

۳-۴- روش موازنه‌ی رسوب

در این روش، سینی تعادل رسوب در نانوسیال تازه فرو می‌رود و وزن رسوب نانوذرات در طی یک پریود زمانی مشخص اندازه‌گیری می‌شود. سپس جزء ذرات رسوب‌کرده در زمان مورد نظر از رابطه‌ی ۱ محاسبه می‌شود؛ W_0 وزن کل نانوذرات در آن بازه‌ی زمانی و W وزن نانوذرات رسوب‌کرده در بازه‌ی زمانی مورد نظر است [۱۹].

$$F_s = \frac{(W_0 - W)}{W_0} \quad (۱)$$

۳-۵- تست پتانسیل زتا

همواره ذره در داخل سیال دارای بار سطحی بوده و در اطراف سطح ذره‌ای که درون سیال قرار گرفته است، افزایش غلظت یون‌های با بار مخالف سطح ذره دیده می‌شود؛ بنابراین یک لایه‌ی اضافی از این یون‌ها سطح ذره را احاطه می‌کند و لایه‌ی اضافی دیگری در دور ذره به‌وجود می‌آورد. این لایه‌ی به‌وجودآمده‌ی دور ذره را می‌توان به دو قسمت تقسیم کرد:

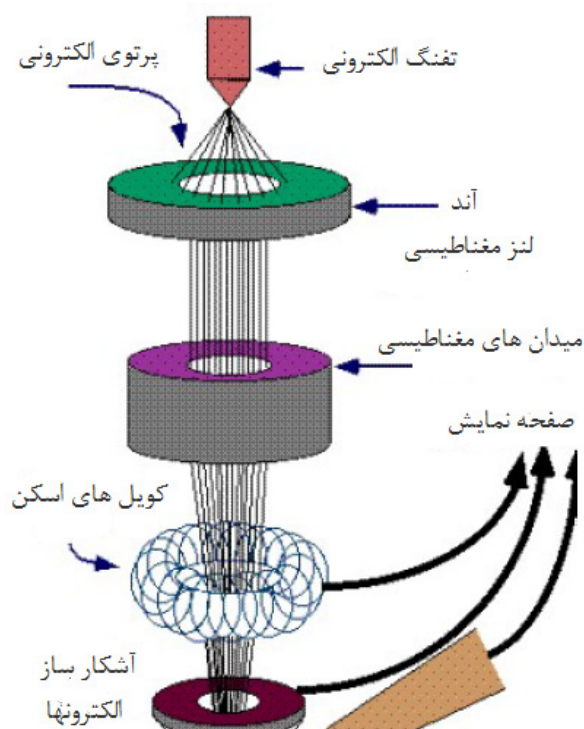
قسمت درونی: شامل یون‌هایی است که به‌صورت قوی با سطح خارجی غشا اتصال پیدا کرده است.

قسمت بیرونی یا ناحیه‌ی پراکنده که یون‌ها در آن قسمت در حالت تعادل یونی به‌سر می‌برند.

وقتی ذره‌ی درون سیال حرکت می‌کند، لایه‌های درونی و بیرونی اطراف آن نیز به همراه ذره جابجا می‌شوند و با ذره حرکت می‌کنند؛ بنابراین می‌توان یک فاصله‌ی فرضی بین ذره و محیط سیال تصور کرد که این فاصله‌ی فرضی همان لایه‌ی مضاعفی است که ذره را احاطه کرده

جدول ۱: مقدار پایداری بر اساس پتانسیل زتا

پتانسیل زتا [mV]	پایداری
۰	پایداری کم (ناپایدار)
۱۵	پایداری کم با مقداری ته‌نشینی
۳۰	پایداری متوسط
۴۵	پایداری خوب
۶۰	-----



شکل ۱۱: شماتیک دستگاه SEM [۲۱]

۳-۶ استفاده از تصاویر TEM و SEM

میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) و میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM) از ابزارهای بسیار مفید برای تشخیص شکل، اندازه و توزیع ذرات نانوسیال هستند.

وسیله‌ای است که به کمک آن SEM می‌توان تصویر بزرگ‌تر از نمونه را با کمک الکترون‌ها (به جای نور) خلق کرد. پرتویی از الکترون‌ها به کمک تفنگ الکترونی میکروسکوپ تولید می‌شود. پرتو الکترونی در خلأ به صورت عمودی از میکروسکوپ عبور می‌کند. سپس با عبور از میدان‌های الکترومغناطیسی و لنزهای ویژه به صورت متمرکز به نمونه تابانده می‌شود. به محض برخورد پرتو با نمونه، الکترون‌ها و اشعه‌های ایکس از نمونه خارج می‌شوند. سپس آشکارسازها پرتوهای ایکس، الکترون‌های اولیه و الکترون‌های ناشی از برخورد الکترون‌های اولیه با جسم را جمع‌آوری می‌کنند و آن‌ها را به سیگنال مبدل کرده و به صفحه‌ی نمایش منتقل می‌کنند و به این طریق تصویر نهایی تهیه می‌شود (شکل ۱۱).

در روش (TEM)، پرتو الکترونی به بخش بزرگی از نمونه تابیده می‌شود و پرتو الکترونی از نمونه عبور می‌کند. پرتو الکترونی عبوری روی یک صفحه‌ی حساس به پرتو الکترونی تابانده می‌شود و از این طریق تصویر ایجاد می‌شود. برای اینکه پرتو الکترونی بتواند از داخل نمونه عبور کند، ضخامت نمونه باید کمتر از ۱۰۰ نانومتر باشد؛ از این رو برای تصویربرداری از نمونه‌های غیرپودری، نیاز است تا نمونه نازک شود و این امر در برخی موارد بسیار مشکل است. برای نمونه‌های پودری با اندازه‌ی ذرات کوچکتر از ۱۰۰ نانومتر، نیاز به آماده‌سازی خاصی وجود ندارد.

TEM قدرت بزرگ‌نمایی و تفکیک بالاتری نسبت به SEM دارد، ولی آماده‌سازی نمونه‌های غیرپودری برای TEM هزینه‌بر و زمان‌بر است. SEM از سطح نمونه تصویربرداری می‌کند؛ از این رو برای بررسی پدیده‌های سطحی و بررسی مورفولوژی، باید از SEM استفاده کرد.

۳-۷- استفاده از پراکنش نور DLS

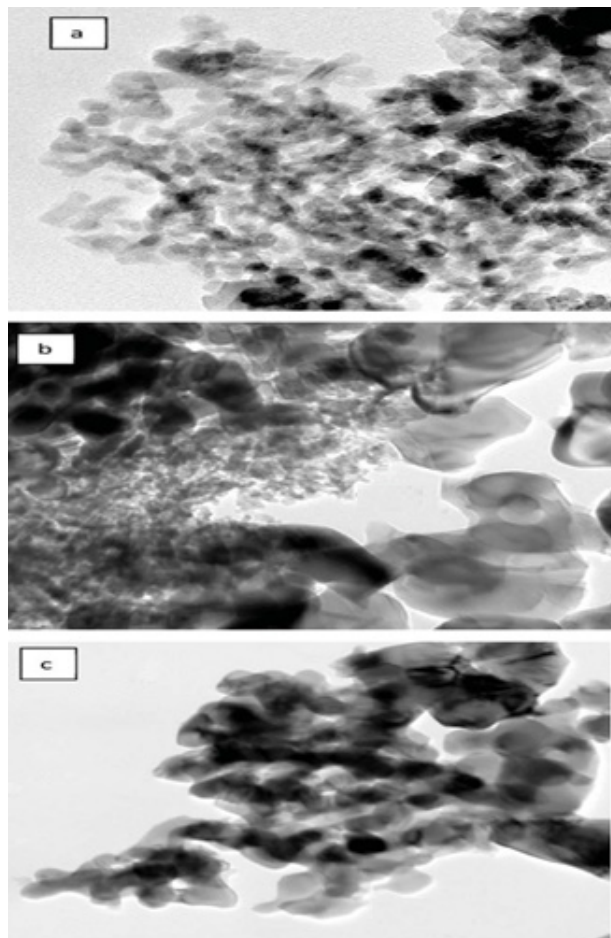
در این روش، یک پرتو لیزر به سوسپانسیون تابانده می‌شود و پراکندگی نور لیزر توسط یک آشکارساز نوری ثبت می‌شود. ذرات با اندازه‌های مختلف نور را به صورت‌های مختلفی پراکنده می‌کنند. ذرات بزرگ‌تر نور را در زوایای کوچک‌تری پراکنده می‌کنند، درحالی‌که ذرات کوچک‌تر در محدوده‌ی زوایای وسیع‌تری نور را پراکنده می‌سازند. پراکندگی نور توسط ذرات جامد باعث ایجاد یک الگو از نقاط روشن و تاریک روی آشکارساز می‌شود. این الگوهای روشن و تاریک با حرکت ذرات تغییر می‌کنند و باعث می‌شوند که الگوی ایجادشده با زمان تغییر کند. نرم‌افزار دستگاه DLS با بررسی تغییرات این الگو با زمان می‌تواند توزیع اندازه‌ی ذرات را مشخص کند. ذرات بزرگ‌تر سرعت کمتری در محلول نسبت به ذرات کوچک‌تر دارند. ازاین‌رو تغییرات الگوی پراش در سوسپانسیونی با ذرات بزرگ‌تر کندتر از سوسپانسیونی با ذرات ریزتر تغییر می‌کند [۱۹].

ارتباط بین اندازه‌ی ذرات و سرعت حرکت براونی توسط رابطه‌ی استوکس انیشتین برقرار می‌شود (رابطه‌ی ۲).

$$d_H = \frac{KT}{3\pi\eta D} \quad (2)$$

d_H : قطر هیدرودینامیکی ذره، K : ثابت بولتزمن، η : ویسکوزیته دینامیکی حلال است که به دما وابسته بوده و به چگالی و فشار سیستم مرتبط نیست. T : دمای مطلق و D : ضریب نفوذ است [۲۴].

در شکل ۱۲، تصویر TEM از نانوذرات Al_2O_3 با قطرهای ۲۰ nm، ۵۰ nm و ۱۰۰ nm نشان داده شده است.



شکل ۱۲: تصویر TEM از نانوذرات Al_2O_3 (a) ۲۰ nm، (b) ۵۰ nm، (c) ۱۰۰ nm [۲۲]

رحمتی‌نژاد و عظیم‌پور در تحقیق خود تصاویر TEM را توسط دستگاه میکروسکوپ الکترونی عبوری مدل H۹۵۰۰ (دارای رزولوشن بالا و نقطه‌به‌نقطه از ۰/۱۸ نانومتر و وضوح شبکه از ۰/۱ نانومتر) و تصاویر SEM توسط دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی مدل Su۳۵۰۰ شرکت HITACHI (با قدرت تفکیک ۱ تا ۵ نانومتر) گرفتند [۲۳].

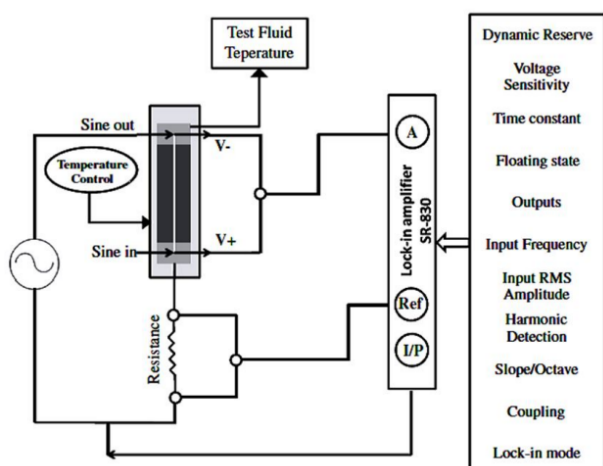
۳-۸- استفاده از اسپکتروفتومتر

اسپکتروفتومتری یا طیف‌سنجی که روش آنالیز آن با طیف‌سنجی مرئی - فرابنفش یکسان بوده و نتایج مشابهی را گزارش می‌کند، روشی است که با استفاده از عبور نور از یک آنالیت در یک محلول شیمیایی و تعیین میزان جذب و عبور نور از آن به تعیین خصوصیات آن آنالیت و ماده شیمیایی می‌پردازد. نور مورد استفاده طیفی از انرژی الکترومغناطیس است که هر طیف نوری دارای طول موج و فرکانس مشخصی می‌باشد. میزان جذب هر ماده‌ی شیمیایی در طول موج‌های مختلف انرژی الکترومغناطیس متفاوت است. با توجه به این امر، هر ماده‌ی شیمیایی در طول موج خاصی از انرژی الکترومغناطیس حداکثر جذب و حداقل عبور را خواهد داشت که این فرآیند در جهت تعیین خاصیت آن ماده‌ی شیمیایی استفاده می‌شود [۲۵]. همچنین غلظت هر ماده‌ی شیمیایی نیز در میزان جذب طول موج خاصی از امواج الکترومغناطیس تأثیر دارد. به‌طوری‌که با افزایش غلظت ماده، میزان جذب در طول موج مشخص افزایش و با کاهش غلظت، میزان جذب کاهش و مقدار نور عبوری افزایش می‌یابد که به‌نام قانون بیر شناخته می‌شود. در این روش، با استفاده از تأثیر متقابل غلظت ماده و میزان جذب نور عبوری از آن ماده، به تعیین رابطه و معادله‌ی غلظت - جذب هر ماده‌ی شیمیایی می‌پردازند. بر اساس قانون بیر، با افزایش غلظت ماده، میزان جذب در طول موج مشخص افزایش و با کاهش غلظت، میزان جذب کاهش و مقدار نور عبوری افزایش می‌یابد. نتایج این دستگاه برای توصیف کمی پایداری کلئیدی سوسپانسیون مورد استفاده قرار می‌گیرد. پایداری سوسپانسیون اغلب به شکل اندازه‌گیری حجم ته‌نشین‌شده برحسب زمان

ته‌نشینی بررسی می‌شود. عیب این روش این است که برای نانوسیالات با غلظت بالا، به‌خصوص محلول نانوتیوب‌های کربنی مناسب نیست.

۳-۹- استفاده از روش امگا-۳

در این روش، پایداری کلئیدی نانوسیال از طریق یافتن نمو تغییرات ضریب هدایت حرارتی در محدوده‌ی وسیعی از کسرهای حجمی نانوذرات مشخص می‌شود. دامنه‌ی استفاده از این روش در تحقیقاتی که تاکنون انجام گرفته محدود است [۱۹]. مشابه روش سیم داغ، روش امگا-۳ با استفاده از یک جریان شعاعی گرما در یک المنت که در عمل، هم به عنوان هیتر، و هم به عنوان دماسنج استفاده می‌شود، عمل می‌کند [۱۹ و ۲۰]. استفاده از نوسانات دما به‌جای پاسخ وابسته به زمان، تفاوت عمده‌ی این روش نسبت به سیم داغ گذراست. مطابق شکل ۱۳، جریان سینوسی با فرکانس ω از طریق سیم فلزی عبور می‌کند و تولید موج گرما با فرکانس 2ω می‌کند که توسط جزء ولتاژ به فرکانس 3ω تبدیل می‌شود.



شکل ۱۳: شماتیک دستگاه روش امگا-۳ [۲۸]

انتقال حرارت امتیاز کوچک‌سازی تجهیزات را به همراه دارد که موجب صرفه‌جویی در مصرف انرژی نیز می‌شود؛ بنابراین نانوسیال از لحاظ اقتصادی نسبت به سیالات پایه بسیار مقرون به صرفه است. روش‌های شیمیایی و فیزیکی متفاوتی برای ایجاد پایداری در سوسپانسیون ارائه شده است که از بین آن‌ها می‌توان به تغییر اسیدیته، استفاده از سورفکتانت‌ها و ارتعاش مافوق صوت اشاره کرد.

۶- مراجع

[۱] ریحانی، مجید، عابدین، آرمین & ابراهیمی ممقانی، علی. (۱۳۹۶). نگاهی بر خواص، عملکرد و پایداری نانوسیال‌ها و فروسیال‌ها. مهندسی مکانیک، ۲۶(۵)، ۳۸-۴۹.

[۲] ولی‌زاده، کامران و تاج‌دینی، پدرام و خباززاده، محمد و طهماسبی، محمد مهدی، ۱۳۹۱، ویسکوزیته در نانو سیالات، اولین کنفرانس بین‌المللی نفت، گاز، پتروشیمی و نیروگاهی، تهران.

[3] Choi S. U. S., Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles. Developments and Applications of Non-Newtonian Flows, Vol. 231, No.66, pp. 99-105, 1995.

[4] Masuda T., Ebata A., Teramae K., Hishinuma N., Alteration of thermal conductivity and viscosity of liquid by dispersing ultra-fine particles (Dispersion of Al_2O_3 , SiO_2 and TiO_2 ultra-fine particles). Netsu Bussei, Vol. 4, pp. 227-233, 1993.

[5] Ali, N., Bahman, A. M., Aljuwayhel, N. F., Ebrahim, S. A., Mukherjee, S., & Alsayegh, A. (2021). Carbon-Based Nanofluids and Their Advances towards Heat Transfer Applications-A Review. Nanomaterials (Basel, Switzerland), 11(6), 1628. <https://doi.org/10.3390/nano11061628>.

حجم سیال مورد نیاز برای محاسبه‌ی خواص در حالت پایدار در روش ۳D در حدود میکرولیتر است که در مقایسه با سایر روش‌ها، مانند سیم داغ گذرا بسیار کمتر است که این خاصیت بیشتر برای مایعات گران‌قیمت، مانند نانوسیال، مایعات بیولوژیک و غیره مفید است [۲۹]. تاومن و تارگات هدایت حرارتی نانوسیالات آب‌اکسید آلومینیوم، آب TiO_2 و آب SiO_2 در کسر حجمی‌های مختلف و دماهای مختلف را به روش ۳D مورد مطالعه قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که هدایت حرارتی نانوسیالات با افزایش کسر حجمی نانوذرات افزایش می‌یابد [۳۰].

۴- فهرست علائم

W	وزن نانوذرات رسوب‌کرده، gr
w_c	وزن کل نانوذرات، gr
d_H	قطر هیدرودینامیکی ذره، mm
K	ثابت بولتزمن
η	ویسکوزیته دینامیکی حلال
T	دمای مطلق
D	ضریب نفوذ

۵- نتیجه‌گیری

تکنولوژی جدید به کارگیری نانوسیالات افق‌های روشنی در مطالعات انتقال حرارتی ایجاد کرده است، اما مشکل عمده‌ی این سیالات بحث پایداری بلندمدت آنان می‌باشد که کاربرد آن‌ها را در مصارف صنعتی با محدودیت مواجه کرده است. پایداری نانوذرات در سیال پایه تأثیر بسزایی در بهبود انتقال حرارت دارد. افزایش

of Al_2O_3 Nanoparticles in Water and Ethylene Glycol Based Fluids. *Journal of Nanostructures*, 12(3), 642-659.

[15] Peyghambarzadeh S. M., Hashemabadi S. H., Naraki M., & Vermahmoudi Y., Experimental study of overall heat transfer coefficient in the application of dilute nanofluids in the car radiator. *Applied Thermal Engineering*, Vol. 52(1), pp. 8-16, 2013.

[16] Elias M. M., Mahbubul I. M., Saidur R., Sohel M. R., Shahrul I. M., Khaleduzzaman S. S., Sadeghipour S., Experimental investigation on the thermo-physical properties of Al_2O_3 nanoparticles suspended in car radiator coolant. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 54, pp. 48-53, 2014.

[17] Rahmatinejad, B., Abbasgholipour, M., & Mohammadi Alašti, B. (2021). Investigating thermo-physical properties and thermal performance of Al_2O_3 and CuO nanoparticles in Water and Ethylene Glycol based fluids. *International Journal of Nano Dimension*, 12(3), 252-271.

[18] Prashanth P. A., Raveendra R. S., Hari Krishna R., Ananda S., Bhagya N. P., Nagabhushana B. M., Lingaraju K., Raja Naika H., Synthesis, characterizations, antibacterial and photoluminescence studies of solution combustion-derived $\alpha-Al_2O_3$ nanoparticles. *Journal of Asian Ceramic Societies*, Vol. 3, pp.345-351, 2015.

[19] XU R., Particle Characterization: Light Scattering Methods. Kluwer Academic Publishers, 2002.

[20] Ghadimi A., Saidur R., Metselaar H. S. C., A review of nanofluid stability properties and characterization in stationary conditions. *Int.J. Heat and Mass Transfer*, Vol. 54, pp.4051-4068, 2011.

[21] Walock, M. J. (2012). Nanocomposite coatings based on quaternary metal-nitrogen and nanocarbon

[6] Keblinski P., Phillpot S. R., Choi S. U. S., Eastman J. A., Mechanisms of heat flow in suspensions of nano-sized particles (nanofluids). *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 45, pp. 855-863, 2002.

[۷] رحمتی نژاد، بهمن، عباسقلی پور، مهدی، محمدی السی، بهزاد. (۱۴۰۱). ارزیابی تجربی انتقال حرارت رادیاتور تراکتور MF ۲۸۵ با استفاده از نانوسیال $water+Al_2O_3$ ماشین‌های کشاورزی.

[8] Chakraborty S., Panigrahi P. K. Stability of nanofluid: A review. *Appl. Therm. Eng.* 2020;174:115259.

doi: 10.1016/j.applthermaleng.2020.115259

[9] Wen D., Lin G., Vafaei S., Review of nanofluids for heat transfer applications. *Particuology*, Vlo. 7, pp. 41-50, 2009.

[10] Tajik B., Abbassi A., Saffar-Avval M., and Najafabadi M. A., Ultrasonic properties of suspensions of TiO_2 and Al_2O_3 nanoparticles in water. *Powder Technology*, vol. 217, pp. 171-176, 2012.

[11] Ho C., Liu W., Chang Y., Lin C., Natural convection heat transfer of alumina-water nanofluid in vertical square enclosures: an experimental study. *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 4, no. 2, pp. 1345-1353, 2010.

[12] Humenic G., Humenic A., Heat transfer characteristics in double tube helical heat exchangers using nanofluids. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 54, no. 9, pp. 4280-4287, 2011.

[13] Sherve A., Shafie M., Bastani H., Firoozzadeh M., Bozorghmerian M. Experimental study of heat transfer coefficient in carbon-water nanofluid in turbulent flow. *Second International Congress of Science and Engineering*. 2018. (In Persian)

[14] Rahmatinejad, B. (2022). Investigating Thermophysical Properties and Thermal Performance

SCIENTIFIC INSTRUMENTS, Vol. 76, pp. 124902-1-14, 2005.

[27] E. Yusibani, P. L. Woodfield, M. Fujii, K. Shinzato, X. Zhang, Y. Takata, Application of the Three-Omega Method to Measurement of Thermal Conductivity and Thermal Diffusivity of Hydrogen Gas, *Int J Thermophys*, Vol. 30, pp. 397–415, 2009.

[28] K. T. Wojciechowski, R. Zybala, R. Mania, Application of DLC layers in 3-omega thermal conductivity method, *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, Vol. 37, No. 2, pp. 512-517, 2009.

[29] G. M. Paul, I. Chopkar, P. K. Manna, Techniques for measuring the thermal conductivity of nanofluids: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 14, pp. 1913–1924, 2010.

[30] Tavman, I., & Turgut, A. L. P. A. S. L. A. N. (2010). An investigation on thermal conductivity and viscosity of water based nanofluids. In *Microfluidics Based Microsystems* (pp. 139-162). Springer, Dordrecht.

systems. The University of Alabama at Birmingham.

[22] Saheed A. A., Sharifpur M., Meyer J. P., Influence of ultrasonication energy on the dispersion consistency of Al_2O_3 -glycerol nanofluid based on viscosity data, and model development for the required ultrasonication energy density. *Journal of Experimental Nanoscience*, Vol. 11(8), pp. 630-649, 2016.

[۲۳] رحمتی‌نژاد، بهمن، عظیم‌پور شیشوان، فرزین. (۱۴۰۱). ارزیابی تجربی و عددی انتقال گرمای رادیاتور موتور پرکینز A۴,۲۴۸ با استفاده از نانوسیال CuO+water مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز.

[24] Pecora, R. 1985. *Dynamic Light Scattering. Applications of Photon Correlation Spectroscopy*. Springer.

[25] JAMALI, M. R., & TAVAKOLI, M. (2016). Separation and preconcentration trace amounts of mercury (II) from water samples using solvent-assisted dispersive solid phase extraction and spectrophotometric determination.

[26] C. Dames, G. Chen, 1ω , 2ω & 3ω methods for measurements of thermal properties, *REVIEW OF*

تحلیل عددی اندرکنش سیال خون در رگ با دیواره‌ی انعطاف پذیر

ناصر کردانی^{۱*}، حسن خدایاری^۲، رسول محمدی ابوخیلی^۳

۱- دانشیار؛ دانشکده‌ی فنی و مهندسی، دانشگاه مازندران، بابلسر، ایران.

۲- کارشناسی ارشد؛ دانشکده‌ی فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نور، نور، ایران.

۳- کارشناسی ارشد؛ دانشکده‌ی فنی و مهندسی، دانشگاه مازندران، بابلسر، ایران

چکیده

سکته‌ی قلبی و مغزی دلیل اصلی مرگ‌ومیر در دنیا محسوب می‌شوند. اغلب دلیل این مسئله پدیده‌ی گرفتگی رگ‌ها می‌باشد. گرفتگی یک باریک‌شدگی غیرعادی و ناهنجار در رگ یا سایر ارگان‌ها با ساختارهای لوله‌ای شکل در بدن است. هدف از این تحقیق تحلیل جریان درون رگ با اثرات گرفتگی می‌باشد. در این مطالعه، جریان ناپایا بوده و همچنین جریان قبل از ورود کاملاً توسعه‌یافته می‌باشد. بعد از تحلیل چند مدل مختلف، مدل کارو برای شبیه‌سازی سیال غیرنیوتنی خون در نظر گرفته شده است. مدل رگ برای اعتبارسنجی داده‌های شبیه‌سازی از روی مقاله‌ی معتبر انتخاب شده است و نتایج نشان‌دهنده‌ی صحت تقریبی مدل غیرنیوتنی مورد استفاده است. در ادامه‌ی پژوهش، مدل گرفتگی رگ با اندازه‌های مختلف گرفتگی تحلیل شده است. در حالتی که خروجی رگ دارای تنگ‌شدگی باشد، این افزایش سرعت بیشتر شده و تا ۱۲ درصد افزایش سرعت در ناحیه‌ی دوراهی مشاهده می‌شود. هرچند نرم‌افزار توانایی شبیه‌سازی پارگی را ندارد، اما قدرت آستانه‌ی تحمل فشار بافت دیواره نشان‌دهنده‌ی این مطلب است که تا ۵۰ درصد قطر گرفتگی قابل تحمل است. مقادیر فشار در رگ با گرفتگی ۸۰ درصد قطر داخلی و خروجی تنگ‌شده، نشان‌دهنده‌ی ناهم‌گونی فشار و سرعت با شدت زیاد در داخل رگ است که موجب می‌شود در نواحی نزدیک گرفتگی، مقادیر تنش برشی زیاد شود و جریان، دیواره‌ی رگ را تحت فشار قرار دهد.

کلمات کلیدی

سیال غیرنیوتنی، مدل کارو، تحلیل عددی، آنسیس، سیال خون

Numerical Analysis of Blood Interaction in a Vessel with a Flexible Wall

Naser Kordani^{1*}, Hasan Khodayari², Rasool Mohammadi Abokheili³

1- Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering & Technology, University of Mazandaran, Babolsar, Iran

2- MSc, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering & Technology, Nour Islamic Azad University, Nour, Iran

3- MSc/Student, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering & Technology, University of Mazandaran, Babolsar, Iran

Abstract

Heart attack and stroke are the leading causes of death in the world. Often the main reason for this phenomenon is the clogging of arteries. Eclipse is tiny abnormal and abnormal vessels or other tubular structures in the body organs. This project aims is analyzing the flow in the artery-clogging effects. In the present study, unsteady flow and flow developed before is completely eroded. After parsing several different models, the Careau model is considered for the simulation of non-Newtonian fluid in the blood. Vessel model for validation of simulation data is selected from the valid article and the results show the approximate accuracy of the non-Newtonian model is used. The following research vessels of different sizes Eclipse model is analyzed. When the output is narrowing, the vessels have been strongly accelerating, and up to 12%, faster dilemma can be seen. However, the software cannot simulate tears. However, the power of the threshold of bearing pressure on the wall tissue suggests that up to 50 percent of the eclipse diameter is tolerable. Pressure values in the vessels by flooded 80 percent of the inner diameter with Eclipse reflect the diversity of pressure and speed with high intensity within the veins that causes in areas near Eclipse values of shear stress to increase the flow considerably, vessel wall under pressure.

Keywords:

Non-Newtonian Fluid, CAREUA Model, Numerical Analysis, ANSYS, Blood

۱- مقدمه

گرفتگی یا باریک‌شدگی شریان خون با پیامدهای همودینامیک مختلفی از افت فشار مواجه خواهد بود که منجر به توسعه‌ی گرفتگی می‌شود. افت فشار به سرعت جریان و هندسه‌ی گرفتگی بستگی دارد، اما خواص سیال، مانند چگالی و چسبندگی ظاهری نسبتاً ثابت هستند. شریان‌های با گرفتگی متعدد، معلول رشد پلاک در بیماری آترواسکلروسیس هستند که ممکن است تحت شرایط فیزیولوژی خاصی فروپاشی رخ دهد [۳].

باریک‌شدگی عروق اغلب با صدای غیرمعمول جریان خون همراه است که از آشفتگی جریان در مجرای باریک‌شده نتیجه می‌شود و از این طریق می‌توان محل بروز گرفتگی را تشخیص داد. این صداها با استفاده از گوشی طبی قابل‌شنوایی هستند، اما تشخیص بیماری با بعضی از فرم‌های تصویرنگاری طبی (به مجموعه‌ی روش‌ها و تکنیک‌هایی اطلاق می‌شود که به تصویرنگاری از بدن انسان برای اهداف کلینیکی می‌پردازد.) امکان‌پذیر است. در نواحی باریک‌شده، جریان خون به سرعت‌های بالایی می‌رسد و این سرعت‌های بالا می‌توانند فشار ترنس‌مورال^۱ پایین یا منفی ایجاد کنند که منجر به فروپاشی داخل جریان خواهد شد [۳].

فروپاشی دیواره‌ی داخلی رگ فرآیندی است که تحت آن، خم‌شدگی شریان در فشار و تنش معینی قرار دارند و در این شرایط، فروپاشی دیواره‌ی داخلی رگ اتفاق می‌افتد؛ نتیجه‌ی تراکم حاصل از این فروپاشی، سرعت‌بخشیدن به فرآیند خستگی و گسیختگی خواهد بود. اگر جدایی پلاک در کروزر و شریان‌های مغزی رخ دهد، مستقیماً منجر به سکته‌ی قلبی و مغزی می‌شود.

گرفتگی یک باریک‌شدگی غیرعادی و نابهنجار در رگ یا سایر ارگان‌ها با ساختارهای لوله‌ای شکل در بدن است. گاهی اوقات تنگی هم نامیده می‌شود [۱ و ۲]. گرفتگی از منظر مکانیک سیالات [۳]، بیانگر وجود مانعی در سر راه جریان خون داخل رگ است. شاخه‌های عروقی در قسمت‌هایی که دینامیک سیال غیرمعمولی دارند، به عنوان محل‌های مستعد ابتلا به بیماری آترواسکلروسیس^۱ شناخته می‌شوند. مطالعات مکانیک سیالات نشان می‌دهد که آترواسکلروسیس در محل دوشاخگی‌ها که هندسه‌ی پیچیده‌ای دارند (در مناطق با عدد رینولدز بالا و تنش برشی کمتر از تنش برشی متوسط دیواره)، رخ می‌دهد. به‌طور کلی الگوی جریان پیچیده با تنش برشی غیریک‌نواخت و انحنای دیوار ارتباط دارد. به‌علاوه اختلال موضعی و نواحی سیرکولاسیون نقش مهمی در شروع و توسعه‌ی آترواسکلروسیس دارند. تصور می‌شود که پیچیدگی دینامیک جریان خون در پایین‌دست گرفتگی موجب توسعه‌ی بیشتر گرفتگی شده یا سبب آسیب‌پذیری پلاک برای شکست و پدیده‌ی ترومبوسیس^۲ خواهد شد. تقریباً به‌صورت عمومی این قضیه پذیرفته شده است که رگ‌های خونی‌ای که دارای انحنا یا دوشاخگی هستند، به‌دلیل پیچیدگی جریان در این نواحی، مستعد ایجاد گرفتگی هستند [۴]. این پیچیدگی‌های جریان سبب می‌شود هندسه‌هایی که دارای گرفتگی هستند، به‌دلیل طبیعت پالسی‌بودن جریان خون، مستعد تنش برشی‌های بالا، جدایش، سیرکولاسیون و جریان آشفته در دوره‌های زمانی خاصی باشند.

۱- Atherosclerosis

۲- Thrombosis

۳- Transmural

فعالیت پلاک‌های خونی در مواردی، مانند رشد گرفتگی‌ها و به‌طور خاص، زمانی که ترومبوسیس رخ می‌دهد، مورد توجه بسیاری قرار می‌گیرند [۴]. وقتی پلاک‌ها به یکدیگر می‌چسبند، گرفتگی توسعه می‌یابد و زمانی که جریان به اندازه‌ی کافی تنگ و منقبض شد، آشفته‌گی ممکن است افزایش یابد و تنش برشی جریان و دیواره‌ها را بالا ببرد.

برای رگ‌های سالم، جریان خون معمولاً آرام ($1000 < Re$) می‌باشد، اما در حضور گرفتگی، آشفته‌گی به اندازه‌ی کافی می‌تواند در طول سیکل قلبی تولید شود. مطالعات فراوانی وجود دارد که آشفته‌گی را در پایین‌دست گرفتگی در محیط طبیعی (بافت زنده) مشاهده کرده‌اند، به عنوان مثال، تحقیقات استین و همکارانش [۵] در سال ۱۹۷۶، آشفته‌گی را در جریان‌های کاروتید^۱ نشان می‌دهد. سایر مطالعات در محیط مصنوعی جریان‌ها را در حالت گذر به آشفته و مجدداً آرام‌شدن در جریان پالسی نشان می‌دهد؛ بنابراین پیش‌بینی جریان گذرا و آشفته در جریان‌های با رینولدز کم، وقتی که شبیه‌سازی در رگ‌های خونی همراه با گرفتگی انجام می‌شود، بسیار مهم است [۶].

خون مایعی متشکل از سلول‌ها و پلاسماست. بیش از ۹۹ درصد سلول‌ها را گلبول قرمز تشکیل می‌دهد. وزن مخصوص گلبول‌های قرمز حدود ۱٫۱ و دانسیته‌ی پلاسما ۱٫۰۳ می‌باشد. هرگاه پلاسما در یک ویسکومتر^۲ آزمایش شود، مانند یک سیال ویسکوز نیوتنی با ضریب ویسکوزیته‌ای حدود (cp) ۱/۲ رفتار می‌کند. ویسکوزیته‌ی خون با هماتوکریت^۳ (درصد حجم کلی خون اشغال‌شده به وسیله‌ی سلول‌ها) تغییر می‌کند [۶].

خون چندین برابر آب ویسکوزیته دارد و این امر دشواری عبور خون از رگ‌های کوچک را افزایش می‌دهد. هرچه نسبت درصد سلول‌ها (هماتوکریت) بیشتر باشد، اصطکاک بیشتری بین لایه‌های مجاور خون به‌وجود می‌آید و این اصطکاک است که میزان ویسکوزیته را تعیین می‌کند.

فاکتور دیگری که بر روی ویسکوزیته‌ی خون تأثیر می‌گذارد، غلظت و نوع پروتئین‌های موجود در پلاسماست، اما این اثر آنقدر ناچیز است که در بیشتر مطالعات همودینامیک برای آن‌ها اهمیتی قائل نمی‌شوند [۷].

در ادامه به مختصری از تاریخچه‌ی مطالعات صورت‌گرفته پرداخته می‌شود.

علیشاهی و همکاران در سال ۲۰۱۰ به‌صورت عددی به بررسی جریان خون در رگ پرداختند. آن‌ها از نرم‌افزار انسیس برای مدل‌سازی استفاده کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که فشار محاسبه‌شده برای رگ انعطاف‌پذیر ۱۵ درصد کمتر از رگ سخت است، همچنین اثر دیواره‌ی انعطاف‌پذیر بر جریان خون در رگ قابل توجه می‌باشد [۸].

طلوعی و همکاران در سال ۲۰۱۱ به بررسی جریان خون در رگ کاروتید پرداختند. آن‌ها برای شبیه‌سازی از نرم‌افزار انسیس استفاده کردند. شبیه‌سازی به‌صورت سه‌بعدی، خون به‌صورت سیال نیوتنی و غیرنیوتنی و رگ به دو صورت سخت و انعطاف‌پذیر در نظر گرفته شده بود. نتایج طلوعی و همکاران نشان می‌دهد که تنش برشی دیواره‌ی رگ تحت تأثیر مدل خون (نیوتنی یا غیرنیوتنی) است. همچنین تأثیر دیواره‌ی انعطاف‌پذیر بر تنش برشی دیواره غیرقابل چشم‌پوشی می‌باشد [۹].

۱- Carotid

۲- Viscometer

۳- Hematocrit

عبدالخادر و همکاران در سال ۲۰۱۴ به شبیه‌سازی اندرکنش بین جریان خون رگ الاستیک کاروتید پرداختند. آن‌ها این شبیه‌سازی را به وسیله‌ی نرم‌افزار انسیس انجام دادند. این تحقیق به‌صورت سه‌بعدی انجام گرفت. در این تحقیق، تنش برشی، کانتورهای فشار و تغییر شکل دیواره‌ی رگ مورد بررسی قرار گرفت. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که با افزایش تغییرات ناگهانی جریان، سرعت و تنش برشی در ناحیه‌ی تنگ‌شدگی افزایش می‌یابد و همچنین بعد از تنگ‌شدگی، جدایی جریان باعث ایجاد جریان گردابی می‌شود [۱۳].

لیوون و همکاران در سال ۲۰۱۴ به‌صورت آزمایشگاهی به بررسی قطر رگ و سرعت گلبول‌های قرمز خون در رگ پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که انقباض رگ باعث تغییر زیاد در سرعت گلبول‌های قرمز خواهد شد [۱۴].

فیلهوپ و همکاران در سال ۲۰۱۵ به‌صورت آزمایشگاهی به بررسی اندرکنش بین سیال و جامد در یک رگ الاستیک با طول محدود پرداختند. آن‌ها به تجزیه و تحلیل تأثیر اندرکنش سیال و جامد بر ساختار کلی جریان و نوسان جریان آرام در اثر حرکت دیواره‌ی رگ به وسیله‌ی سرعت‌سنجی تصویری ذرات و اندازه‌گیری فشار پرداختند. دامنه‌ی تغییر شکل رگ بین ۰٫۵ تا ۰٫۶ درصد قطر رگ بود. نتایج نشان داد که تغییر شکل رگ باعث کاهش تنش برشی دیوار تا ۲۰ درصد در امتداد جریان می‌شود [۱۵].

دانگ و همکاران در سال ۲۰۱۳ به بررسی رابطه‌ی بین زاویه‌ی عروق کرونر و نیروی مکانیکی در محل دوشاخه‌شدن رگ پرداختند. آن‌ها این تحقیق را با استفاده از نرم‌افزار انسیس^۱ انجام دادند و زاویه‌ی عروق را بین ۷۵ تا ۱۲۰ درجه در نظر گرفتند. نتایج آن‌ها یک رابطه‌ی بین تنش محیطی و عروق کرونر چپ را نشان می‌دهد. همچنین آن‌ها دو فرض الاستیک و غیرالاستیک را برای رگ در نظر گرفتند [۱۰].

سئو در سال ۲۰۱۳ به بررسی جریان خون در رگ کاروتید انسان پرداخت و این بررسی را به وسیله‌ی نرم‌افزار انسیس انجام داد. او به بررسی تأثیر اندرکنش بین سیال و جامد بر ویژگی‌های جریان و تنش برشی دیوار پرداخت. سئو دو مدل جریان را بررسی کرد که در یکی اندرکنش بین جامد و سیال را در نظر گرفت و در دیگری در نظر نگرفت. نتایج نشان دادند که مقدار تنش برشی برای این دو مدل بین ۵ تا ۱۱ درصد تفاوت دارند [۱۱].

قناعت و همکاران در سال ۱۳۹۲ به بررسی عددی جریان دائم غیرنیوتنی خون در رگ همراه با بای‌پس^۲ در حضور میدان مغناطیسی پرداختند. آن‌ها خون را به‌صورت نیوتنی و غیرنیوتنی در نظر گرفتند. همچنین برای جریان غیرنیوتنی از مدل کراس^۳ و کارو^۴ استفاده کردند. آن‌ها از گرفتگی ۵۰ درصد و زاویه‌ی بای‌پس ۴۵ درجه استفاده کردند. نتایج نشان داد که بالاترین تنش برشی در ناحیه‌ی گرفتگی اتفاق می‌افتد و همچنین به وسیله‌ی میدان مغناطیسی می‌توان جریان خون را کنترل کرد [۱۲].

۱- Ansys

۲- Bypass

۳- Cross

۴- Carreau

با وجود اینکه تعداد کمی از مدل‌های تک‌فاز برای جریان گلبول‌های قرمز فرموله شده‌اند، اما مدل‌های دوفاز از نظر محاسباتی هزینه‌برتر از مدل‌های تک‌فاز می‌باشند [۱۹].

واسکوسلوز و همکاران در سال ۲۰۲۰ با شبیه‌سازی عددی جریان عبوری از یک استوانه که مشابه جریان خون در رگ می‌باشد، دریافتند که میانگین زمان محاسبه برای روش المان محدود ده برابر بیشتر از روش حجم محدود است. همچنین بررسی‌ها نشان داد، نتایج هر دو کد عددی تطابق خوبی را با نتایج تجربی دارد [۲۰].

ایتو و همکاران در سال ۲۰۲۱ با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی، تأثیر حضور استنت تغییردهنده‌ی جریان^۱ بر همودینامیک جریان خون را در هندسه‌ی اشکال مختلف سرخرگ و مکان‌های مختلف آنوریسم بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که علی‌رغم مورفولوژی عروقی، استنت تغییردهنده‌ی جریان به‌طور قابل‌توجهی پارامترهای جریان، مانند شدت جریان و جهت آن در داخل آنوریسم را تغییر می‌دهد [۲۱].

هدف از مقاله‌ی حاضر تحلیل جریان درون رگ با سیال غیرنیوتنی خون است. در مطالعه‌ی حاضر، جریان ناپایا بوده و قبل از ورود کاملاً توسعه‌یافته است. مدل کارو برای شبیه‌سازی سیال غیرنیوتنی خون در نظر گرفته شده است. همچنین مقادیر سرعت و فشار همانند واقعیت موجود و با ضربان داده شده است.

نعمتی و همکاران در سال ۲۰۱۷ در یک کانال دوبعدی اثر تجمع نانوذرات بر تغییر سرعت و انحراف جریان خون را بررسی کردند و عدد بی‌بعد نیروی مغناطیسی که نسبت نیروی مغناطیسی به نیروی لختی و عدد رانش مغناطیسی که نسبت سرعت نسبی ذرات به سرعت جریان خون بود را معرفی کردند. نتایج نشان می‌داد که افزایش این دو عدد رابطه‌ی مستقیم با افزایش تجمع نانوذرات در دیواره‌ی بالایی کانال و سرعت خون دارند [۱۶].

بوتی و همکاران در سال ۲۰۱۸ عملکرد دو حل‌کننده‌ی CFD، یکی مبتنی بر روش المان محدود^۱ و دیگری مبتنی بر روش حجم محدود^۲ برای مدل‌سازی همودینامیک خون یک بیمار خاص از آنوریسم^۳ داخل جمجمه‌ای را مقایسه کردند. آن‌ها دریافتند که در تحلیل‌های مرتبه‌ی بالا، مدل المان محدود دقت بهتری را در هر درجه‌ی آزادی ارائه می‌دهد، اما در هر ورودی غیرصفر ژاکوبین^۴ نسبت به مدل حجم محدود دقت کمتری دارد [۱۷].

در سال ۲۰۱۹، حسن‌زاده و همکاران حرکت و تغییر شکل سلول‌های قرمز خون سالم و بیمار در یک رگ با و بدون تنگی برای جریان داخلی غیرقابل‌فشار و چسبناک را با استفاده از روش ترکیبی بولتزمن شبیه‌سازی کرده‌اند [۱۸].

چائو و همکاران در سال ۲۰۱۹، تحلیل عددی خون به عنوان یک سیال غیرنیوتنی را با استفاده از مدل‌سازی دوفازی انجام دادند. در این روش، گلبول‌های قرمز و پلاسما به عنوان فازهای جداگانه در نظر گرفته می‌شوند و معادلات جرم و تکانه برای هر فاز حل می‌شود تا هماتوکریت یا توزیع پلاسما به دست آید. آن‌ها نشان دادند

۱- Finite Element Method

۲- Finite Volume Method

۳- Aneurysm

۴- Jacobian

۵- Flow Diverter Stent

۲- معادلات حاکم

با پدیده‌ی جدایش و گرادیان‌های فشار معکوس لازم شد. برای مدت‌ها، مدل‌های آشفتگی از محاسبه‌ی این جریان‌ها ناتوان بودند. مدل K-ε قادر به ثبت دقیق رفتار لایه‌ی مرزی آشفتگی مجاور دیواره نیست [۲۲].

مدل k-ω دقت بیشتری نسبت به مدل k-ε در لایه‌های نزدیک دیواره دارد و در نتیجه برای جریان‌های با گرادیان فشار معکوس مناسب‌تر است، اما برای جریان‌های با فشار القایی در هنگام جدایش مناسب نیست، اگرچه کارایی بالایی در ناحیه‌ی نزدیک دیواره دارد. به علاوه، معادلات ω حساسیت بالایی در جریان‌های آزاد بیرون لایه‌ی مرزی دارند. این حساسیت در جریان‌های آزاد در مدل‌سازی آشفتگی از جایگزینی معادلات ω به جای معادلات ε استاندارد به طور گسترده جلوگیری می‌کند. این موضوع زمینه‌ساز توسعه‌ی مدل SST k-ω شده است [۲۲].

این مدل در سال ۱۹۹۴ در مدل لزجت ادی^۱ شامل دو نوآوری ارائه شد [۲۲]:

- ۱- ترکیبی از مدل k-ω (در لایه‌ی داخلی لایه‌ی مرزی) و مدل k-ε (در ناحیه‌ی دورتر و بیرون لایه‌ی مرزی)
- ۲- مطرح شدن تنش برشی محدود در ناحیه‌ی گرادیان فشار معکوس

۲-۳-۱- معادلات مدل آشفتگی SST K-ω

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k Y_k + S_k \quad (۴)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \omega u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + G_\omega - Y_\omega + D_\omega + S_\omega \quad (۵)$$

در این معادلات، Gk بیانگر تولید انرژی جنبشی به دلیل تغییرات گرادیان‌های سرعت و Gω بیانگر تولید ω است.

در این بخش، به بررسی معادلات حاکم بر جریان و انواع شرایط مرزی حاکم پرداخته می‌شود. معادلات حاکم بر مسئله به دو بخش تقسیم می‌شوند. بخش اول معادلات مربوط به سیال است که شامل معادلات بقا، مومنتوم و آشفتگی می‌شود. بخش دیگر معادلات حاکم بر دیواره‌ی جامد است که در اندرکنش با سیال می‌باشد.

برای شبیه‌سازی، نرم‌افزار انسیس انتخاب شده است. معادلات حل شده در نرم‌افزار شامل معادلات بقای جرم و مومنتوم هستند.

۲-۱- معادله‌ی بقای جرم

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V}) = 0 \quad (۱)$$

۲-۲- معادله‌ی بقای مومنتوم

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{V}) + \nabla \cdot (\rho \vec{V} \vec{V}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\vec{\tau}) + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (۲)$$

در این معادله، p فشار استاتیکی، تانسور تنش که در معادله‌ی ۳ تعریف شده است، $\rho \vec{g}$ نیروهای گرانشی و $\vec{F}$ نیروهای خارجی است که در این مسئله صفر است. تانسور تنش عبارت است از:

$$\vec{\tau} = \mu [(\nabla \vec{V} + \nabla \vec{V}^T) - \frac{2}{3} \nabla \vec{V} I] \quad (۳)$$

که در آن μ لزجت مولکولی و I تانسور همانی است.

۲-۳- مدل آشفتگی SST K-ω

نقطه‌ی شروع توسعه‌ی مدل آشفتگی انتقال تنش برشی زمانی بود که نیاز به محاسبات دقیق جریان‌های همراه

Γ_k و Γ_ω به ترتیب نماینده‌ی انتشار مؤثر k و ω هستند. Y_k و ω نیز اتلافات k و ω به دلیل وجود آشفستگی هستند.

$$F_1 = \tanh \Phi_1^4 \quad (14)$$

$$\Phi_1 = \min[\max(\frac{\sqrt{k}}{0.09\omega y}, \frac{500\mu}{\rho y^2 \omega}), \frac{4\rho k}{\sigma_{\omega,2} D_{\omega}^+ y^2}] \quad (15)$$

$$D_{\omega}^+ = \max[2\rho \frac{1}{\sigma_{\omega,2}} \frac{1}{\omega} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \frac{\partial k}{\partial x_j}, 10^{-20}] \quad (16)$$

$$F_2 = \tanh \Phi_2^2 \quad (17)$$

$$\Phi_2 = \max[2\frac{\sqrt{k}}{0.09\omega y}, \frac{500\mu}{\rho y^2 \omega}] \quad (18)$$

y فاصله تا سطح بعدی و D_{ω}^+ بخش مثبت معادله‌ی تقاطع انتشار است [۲۳].

۲-۴- فاز جامد

مختصات جامد توسط یک دستگاه مختصات لاگرانژی بیان شده که در آن، ذرات توسط دستگاه مختصات متحرک دنبال می‌شوند. در حالت کلی، معادله‌ی مومنتم الاستودینامیک جامد را می‌توان به شکل رابطه‌ی زیر بیان کرد:

$$\nabla \cdot \tau_s + f_s^B = \rho_s d_s \quad (19)$$

که sp چگالی دیواره‌ی شریان، τ_s تانسور تنش جامد، fsB نیروهای حجمی بر واحد حجم و ds شتاب محلی جامد است. تاکنون تلاش‌های فراوانی برای مشخص کردن رفتار ماده‌ی دیواره انجام پذیرفته است. مطالعات بسیاری از رفتار دیواره بر اساس الاستیسیته‌ی خطی گزارش شده که این مطالعات شامل مدل‌سازی با یک سفتی یکسان یا با سفتی‌های متفاوت بوده است. همچنین آزمایش‌ها رفتار ماده‌ی دیواره را به دو صورت الاستیک ایزوتروپیک

۲-۳-۲- مدل‌سازی ضرایب پخش مؤثر

ضرایب پخش مؤثر در مدل $K-\omega$ به صورت زیر هستند [۲۳]:

$$\Gamma_k = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \quad (6)$$

$$\Gamma_\omega = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \quad (7)$$

که σ_k و σ_ω اعداد پراوتل آشفستگی برای k و ω هستند. لزجت آشفستگی، μ_t به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$\mu_t = \frac{\rho k}{\omega} \frac{1}{\max[\frac{1}{\alpha^*}, \frac{\Omega F_2}{\alpha_1 \omega}]} \quad (8)$$

$$\Omega = \sqrt{2\Omega_{ij}\Omega_{ij}} \quad (9)$$

$$\sigma_k = \frac{1}{\frac{F_1}{\sigma_{k,1}} + \frac{(1-F_1)}{\sigma_{k,2}}} \quad (10)$$

$$\sigma_\omega = \frac{1}{\frac{F_1}{\sigma_{\omega,1}} + \frac{(1-F_1)}{\sigma_{\omega,2}}} \quad (11)$$

Ω_{ij} نرخ متوسط تانسور چرخش و ضریب α^* میراکننده‌ی لزجت آشفستگی و موجب اصلاح آن در اعداد رینولدز پایین می‌شود.

$$\alpha^* = (\frac{\alpha_0^* + \frac{Re_t}{R_k}}{1 + \frac{Re_t}{R_k}}), Re_t = \frac{\rho k}{\mu \omega} \quad (12)$$

$$R_k = 6, \alpha_0^* = \frac{\beta_i}{3}, \beta_i = 0.072 \quad (13)$$

این نکته قابل ذکر است که در مدل $K-\omega$ مخصوص اعداد

بازشدن دریچه‌ی الاستیک در اثر نیروی ستون سیال پشت آن استفاده می‌شود که در مقایسه با نتایج تجربی، توانایی این روش در حل مسائل سیال و سازه را به اثبات رساند [۲۴].

روش جستجوگر نسبت به حل تحلیلی برای بیشینه‌ی سرعت در خط مرکزی جریان در لحظات مختلف نشان می‌دهد که جواب‌های به دست آمده‌ی این روش منطبق بر جواب‌های تحلیلی است. نتایج این روش به نتایج حاصل از نرم افزار فلوئنت نزدیک تر است [۲۵].

ضربان به صورت پالسی انتخاب شده است و چون نرم افزار فلوئنت قادر به تعریف این نوع ضربان نیست، کدهای تعریف شده توسط کاربر برای سیستم به صورت جداگانه تعریف می‌شود. هندسه‌ی رگ که شامل یک دوراهی با قطر خروجی ۲ برابر قطر ورودی می‌باشد، ترسیم شده و در ناحیه‌ی قبل از دوراهی گرفتگی با درصد‌های مختلف مورد آزمایش و مقایسه قرار می‌گیرد. برای ایجاد تنش بیشتر در رگ و پیچیده تر کردن مسئله، قطر یکی از خروجی‌ها به نصف کاهش پیدا کرده و نتایج حاصل با یکدیگر مقایسه می‌شود. این پیچیدگی ما را قادر می‌سازد تا مسائل مشابه را حل و اطلاعات خروجی را آنالیز کنیم. مدل‌های مختلف برای تعریف سیال خون در نرم افزار موجود است. مدل‌های انتخاب شده شامل سه مدل کارو، پاورلاو غیرنیوتونی^۱ و پاورلاو نیوتونی^۲ هستند و مدل کارو در مقایسه با حل تحلیلی کمترین خطا را دارد.

تحلیل عددی با استفاده از یک کد تجاری انسیس که نرم افزاری جهت تحلیل می‌باشد، انجام گرفته است. برای شبیه سازی، ابتدا مدل مورد نظر در نرم افزار کتیا^۳ ترسیم و سپس در نرم افزار گمبیت^۴ شبکه بندی می‌شود. در

غیرخطی (هایپرالاستیک) و غیرایزوتروپیک گزارش داده‌اند. در مطالعه‌ی حاضر می‌توان از دو مدل ایزوتروپیک و غیرایزوتروپیک برای مدل سازی رفتار ماده‌ی دیواره استفاده کرد. مدل ماده‌ی مونی - ریولین که یک پاسخ ایزوتروپیک غیرخطی و هایپرالاستیک را برای توابع چگالی انرژی کرنشی ارائه می‌دهد، برای دیواره در معادله‌ی زیر ارائه شده است:

$$\psi_1 = \alpha(I_1 - 3) + \gamma(I_1 - 3)^2 \quad (20)$$

که در آن Ψ چگالی انرژی کرنشی، I_1 اولین متغیر از سمت چپ تانسور کوچی - گرینو مقادیر α و γ بر مبنای اطلاعات تجربی انتخاب شده‌اند.

۳- تحلیل و بررسی نتایج

مدل‌های زیادی برای شبیه سازی سیال خون غیرنیوتونی در رگ ارائه شده‌اند، ولی هیچ یک نتوانسته‌اند تا رفتار الاستیک دیواره‌ی رگ در اثر فشار پالسی خون را همانند نمونه‌ی واقعی تحلیل نمایند تا میزان انحراف به حداقل برسد؛ این مسئله یکی از دلایل عدم موفقیت محققان نسبت به سایر مدل‌ها شده است. شبیه سازی کامپیوتری قادر به حل پیچیده ترین مسائل علوم مهندسی می‌باشد؛ از این رو در این گونه مسائل، از تمامی الگوریتم‌های مورد نیاز، طبق نمونه‌ی واقعی رگ شبیه سازی صورت می‌گیرد.

روش هیدرودینامیکی ذرات همواره به عنوان یک روش لاگرانژی بدون مش برای شبیه سازی اثر متقابل سیال و سازه توسعه یافته است. این الگوریتم با شبیه سازی دوبعدی جریان خون دریچه‌ی نوینی را در برابر کاربرد روش SPH می‌گشاید. از این روش برای شبیه سازی

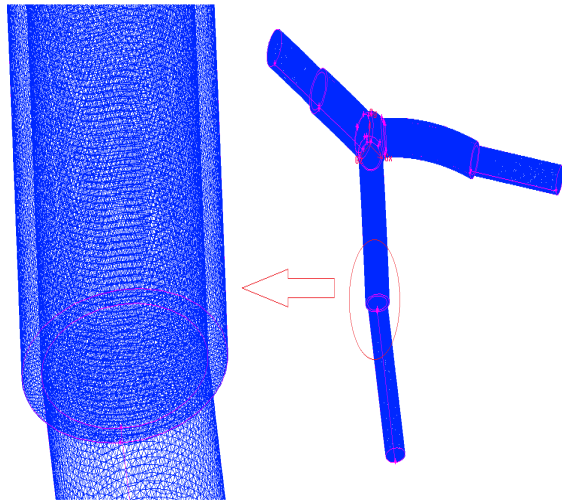
۱- Non-newtonian power law

۲- Newtonian power law

۳- Catia

۴- Gambit

شکل ۲، نمایی از شبکه‌ی تولیدشده قابل مشاهده است.



شکل ۲: نمایی از شبکه‌ی تولیدشده

۳-۳- شرایط مرزی حل عددی

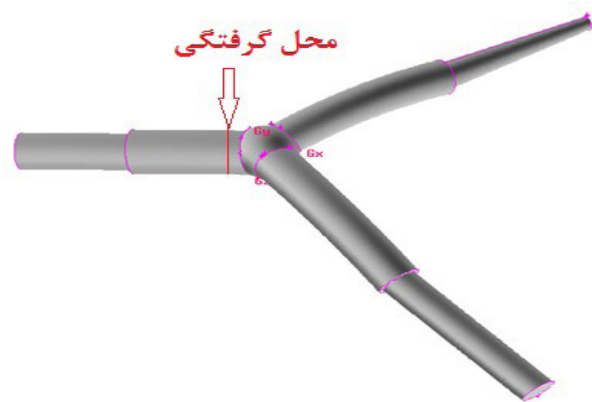
برای تحلیل عددی در نرم‌افزار فلوئنت، نیاز به دادن شرایط مرزی است. شرط مرزی بدنه بدون لغزش فرض شده است. برای مدل‌سازی جریان ورودی، از مقادیر دبی جرمی داده‌شده در مرجع استفاده شده است. برای دو خروجی رگ نیز از شرط مرزی فشار خروجی استفاده شده است. از آنجاکه حل به صورت ناپایاست، برای دادن شرایط مرزی ورودی و خروجی از کد کاربر^۱ استفاده شده است. در شکل ۳، نمایی از هندسه‌ی مورد نظر به همراه شرایط مرزی و در شکل ۴، مقادیر داده‌شده توسط مرجع قابل مشاهده است [۱۰].

مرحله‌ی بعد این شبکه به نرم‌افزار انسیس وارد شده و پس از دادن مقادیر شرایط مرزی و تعیین روش حل تحلیل می‌شود. شبیه‌سازی با استفاده از نرم‌افزارهای شبیه‌ساز مراحل خاصی دارد که می‌بایست یک‌به‌یک اجرا شود تا در نهایت نتایج موردنظر حاصل شود. این مراحل به ترتیب عبارتند از:

- ۱- تولید هندسه‌ی مورد نظر
- ۲- شبکه‌بندی
- ۳- اعمال شرایط مرزی یا اولیه
- ۴- حل با استفاده از روش‌های عددی موجود

۳-۱- تولید هندسه

هندسه‌ی مورد نظر در نرم‌افزار طراحی ترسیم شده است. شکل ۱ هندسه‌ی ترسیم‌شده را نشان می‌دهد.



شکل ۱: هندسه‌ی رگ و محل گرفتگی

۳-۲- شبکه‌ی محاسباتی

برای ایجاد شبکه، از نرم‌افزار گمبیت استفاده شده است. این نرم‌افزار توانایی ایجاد شبکه‌ی بی‌سازمان و سازمان‌یافته را دارد. تعداد شبکه‌ی تولیدشده ۵۲۴۰۰۰ المان است. برای تعیین درست تعداد المان، استقلال از شبکه مورد بررسی قرار گرفته و هم‌گرایی برقرار شد. در

این شبکه ممکن است به دلیل کیفیت پایین به حل های عددی با دقت ناکافی منجر شود. نرم افزار گمبیت امکاناتی را برای چنین ارزیابی هایی در خود فراهم آورده است. ابزارهایی که در این نرم افزار قرار گرفته اند، به گونه ای هستند که ارزیابی های مربوط به صحت و همچنین کیفیت شبکه را همزمان با یکدیگر انجام می دهند.

بعد از ایجاد شبکه بر روی سطح ممکن است در هنگام ایجاد شبکه بندی حجمی، با عبارت المان های معکوس^۱ روبه رو شویم. این نوع شبکه دچار مشکل است و هنگام بررسی شبکه در فلوئنت، شبکه رد می شود. سلول معکوس به معنای هم پوشانی چند سلول باهم است که برای رفع این مشکل باید تعداد و محل سلول ها تغییر کنند.

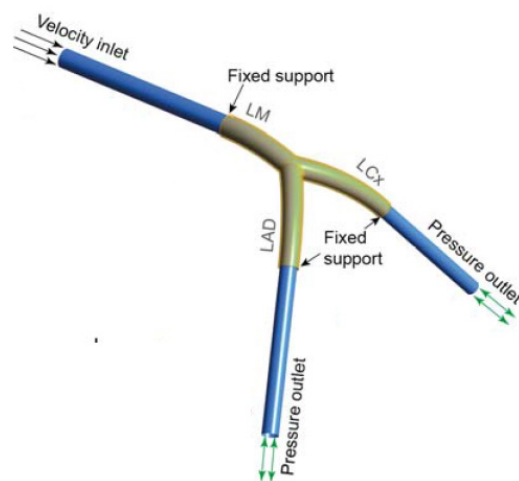
۳-۵- تعریف ماده

برای تعریف ماده ی مورد نظر، از آنجا که خون سیال غیرنیوتنی است، خواص مورد نظر به شرح زیر به نرم افزار داده شده است. چگالی ۱۰۶۰ و لزجت از مدل مورد نظر انتخاب شده است.

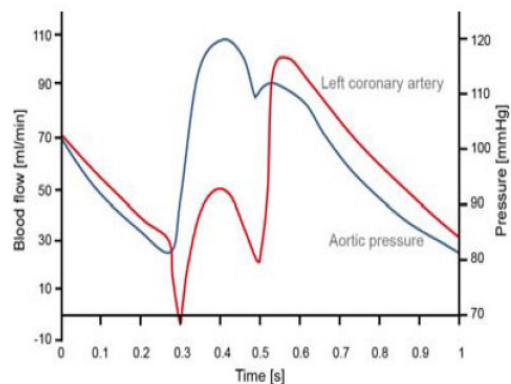
۳-۶- انحراف

انحراف اولین معیار برای بررسی کیفیت شبکه است. انحراف میزان ایده آل بودن شبکه (متساوی الاضلاع یا متساوی الزاویه) بر روی سلول یا صفحه را مشخص می کند. المان های با انحراف بالای ۰/۹ برای حل مناسب نیستند.

صفحات و سلول های با انحراف بالا برای حل قابل قبول نیستند، زیرا در روند حل، تمامی سلول ها متساوی الاضلاع فرض می شوند. در دو بعد، بیشترین میزان انحراف باید



شکل ۳: نمای هندسه ی ترسیم شده به همراه شرایط مرزی

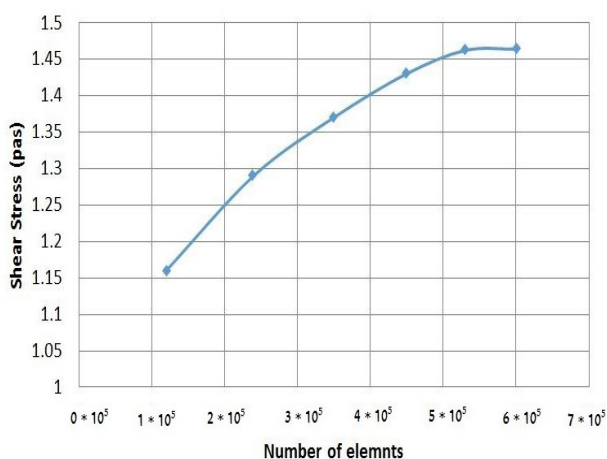


شکل ۴: مقادیر ورودی و خروجی جریان خون بر حسب زمان

در ادامه، پس از فراخوانی هندسه در محیط انسیس، کدهای کاربر نوشته شده اضافه می شوند.

۳-۴- ارزیابی کیفیت شبکه

پس از شبکه بندی میدان حل می توان از این شبکه ی ایجاد شده برای تحلیل های عددی استفاده کرد. در مورد شبکه لازم است دو مورد «صحت» و «کیفیت» مطالعه شود. صحت به معنای این است که در شبکه، حفره و یا هم پوشانی وجود نداشته باشد. کیفیت به معنای این است که شکل سلول ها و اندازه ی نسبی آن ها مناسب باشد.



شکل ۵: نمودار تنش برشی بر حسب تعداد المان

۳-۸- رفتار نزدیک دیواره

یکی از ویژگی‌های اصلی مدل‌های آشفتگی دقت و تطابق با واقعیت در لایه‌های نزدیک دیواره می‌باشد. به همین دلیل، نتایج حل به‌طور حساسی به دقت شبکه در نزدیک دیواره بستگی دارند. برای همین منظور، پارامتری به نام y^+ برای سنجش اندازه‌ی لایه‌های نزدیک به دیواره تعریف گردیده است. قانون لگاریتمی که برای معادلات لایه مرزی و جریان‌های توسعه‌یافته معتبر است، حد بالا و پایینی را برای فاصله‌ی قابل قبول بین مرکز سلول‌ها و دیواره برای سلول‌های مجاور دیواره تعریف می‌کند. این فاصله معمولاً نسبت به واحد دیوار تعریف می‌گردد:

$$y^+ \equiv (\rho \mu - t y) / \mu \quad (21)$$

برای توابع دیواره‌ی استاندارد یا نامتوازن، هر سلول که در نزدیک دیواره است، بر طبق قانون لگاریتمی باید در محدوده‌ی $300 < y^+ < 30$ باشد. y^+ نزدیک به حد پایین حدود (۳۰) برای حل بهتر می‌باشد. برای محاسبه‌ی دقیق‌تر لزجت زیرلایه‌ها، $y^+ \approx 1$ بسیار مناسب می‌باشد و مقادیر $y^+ < 5$ نیز قابل قبول است.

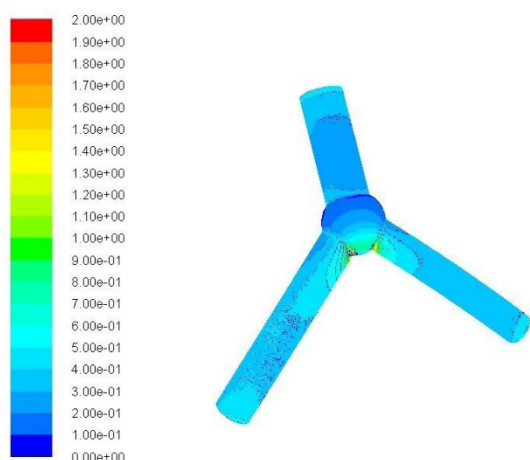
زیر ۵/۰ و میانگین انحراف سلول‌ها ۱/۰ باشد.

در سه بعد، اما به دلیل پیچیدگی هندسه در سه بعد، تعدادی المان ضعیف و متوسط نیز وجود خواهد داشت، اما المان بد نباید وجود داشته باشد. بیشترین انحراف باید زیر ۹/۰ و میانگین انحراف سلول‌ها زیر ۴/۰ باشد.

نسبت صفحه^۱ برای یک صفحه یا سلول، نسبت بلندترین خط به کوتاه‌ترین خط است. تعریف نسبت صفحه برای هر نوع المان متفاوت است. برای صفحه یا سلول متساوی‌الاضلاع نسبت صفحه ۱ است. برای صفحه یا سلول نامنظم بسته به میزان کشیدگی، نسبت صفحه بالاتر از ۱ است. برای صفحات با شبکه‌ی مثلثی و چهارضلعی و شبکه‌های هرمی با اضلاع انحراف، نسبت صفحه نیز بهتر می‌شود. برای سلول‌های منشوری (مستطیلی در دوبعدی)، چک کردن نسبت صفحه مهم است و مناسب بودن انحراف دلیل خوب بودن نسبت صفحه نیست. برای سلول‌های منشوری و همچنین سلول‌های هرمی با صفحات مستطیلی، مقادیر نسبت صفحه باید زیر ۸ باشند. بدترین نسبت صفحه برای کانال مورد نظر ۲/۰۲ می‌باشد که میزان مناسبی است.

۳-۷- استقلال از شبکه

برای اینکه حل مساله مستقل از تعداد المان‌های شبکه باشد، تاثیر این پارامتر مورد تحقیق قرار گرفته است. بدین ترتیب که پارامتر تنش برشی در مقطعی در نزدیک دیواره، در شبکه‌هایی با تعداد المان مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. همانطور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود تعداد المان بیشتر از پانصد هزار در داخل هندسه، استقلال شبکه را نشان می‌دهد.



شکل ۶: مقادیر تنش برشی روی دیواره‌ی داخلی

در جدول ۱، مقادیر تنش برشی برای شبیه‌سازی انجام شده و مقاله‌ی مورد اعتبارسنجی آورده شده است. همان‌طور که قابل مشاهده است، بازه‌ی خطاها از حدود ۷ تا ۱۳ درصد و میانگین خطاها حدود ۱۰ درصد می‌باشد که این مقدار خطا قابل قبول است.

جدول ۱: مقادیر تنش برشی روی دیواره‌ی داخلی برای اعتبارسنجی

X/C (Time (s	Shear Stress(pas) [۱۰].Ref	Shear Stress(pas) CFD	(%)Error
۰	۰,۱۲	۰,۱۱۲	٪۷
۰,۲	۰,۱۸	۰,۱۶۱	٪۱۱
۰,۴	۰,۲۶	۰,۲۸۷	٪۱۰
۰,۶	۰,۳۸	۰,۳۵۱	٪۸
۰,۸	۰,۲۴	۰,۲۱۲	٪۱۲
۱	۰,۱۳	۰,۱۴۷	٪۱۳

در شکل ۷ نیز نمودار این مقادیر برای مقایسه‌ی بهتر آورده شده است.

۳-۹- اندرکنش سازه و سیال

برای تحلیل اندرکنش سازه‌ی سیال، از روش شبکه‌ی دینامیکی^۱ در نرم‌افزار انسیس استفاده می‌شود. در این روش، با استفاده از روش دیفیوژن یا نفوذ، اثر سیال بر روی دیواره و تغییرات آن به دست می‌آید. مقادیر ورودی داده شده در روش شبکه‌ی دینامیکی نشان داده شده است.

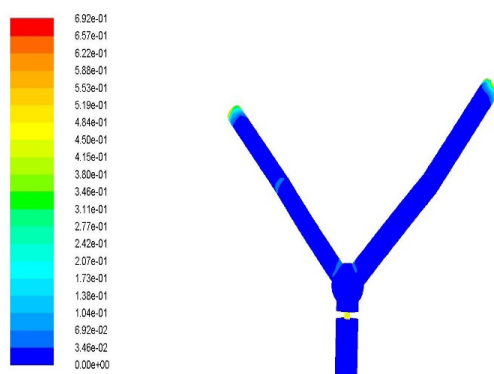
۳-۱۰- مدل شبکه‌ی دینامیکی

نرم‌افزار فلوئنت توانایی حل مدل جریان‌های شامل سلول‌های متحرک را داراست. بسته به نوع پیچیدگی حرکت و فیزیک، جریان یکی از مدل‌های حرکت شبکه برای مدل‌سازی می‌تواند مناسب باشد. یکی از رایج‌ترین مدل‌ها در فلوئنت برای شبیه‌سازی جریان‌ها که دارای شبکه‌ی متحرک و متغیر هستند، مدل شبکه‌ی دینامیکی است.

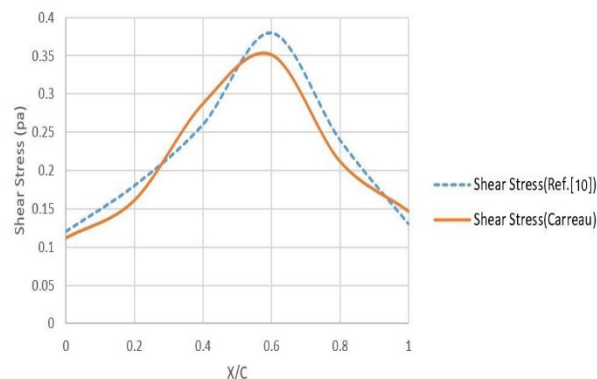
برای استفاده از مدل شبکه‌ی دینامیکی نیاز به شروع با یک حجم شبکه و توصیف هر ناحیه‌ی متحرک در مدل را داریم. فلوئنت قادر به توصیف حرکت تحت پروفیل مرزی بر اساس توابع توصیف شده توسط کاربر است. به‌روزر کردن حجم شبکه به صورت خودکار توسط نرم‌افزار در هر بازه‌ی زمانی بر اساس موقعیت جدید مرزها انجام می‌شود.

۳-۱۱- اعتبارسنجی

برای بررسی صحت نتایج حاصل، به مقایسه‌ی تحلیل حاضر با مقاله مرجع مورد بررسی پرداخته‌ایم [۱۰]. شکل ۶، مقادیر توزیع تنش برشی بر روی دیواره‌ی داخلی را نشان می‌دهد.



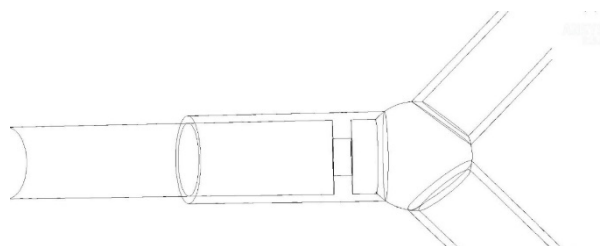
شکل ۹: مقادیر تنش برشی روی دیواره‌ی هندسه‌ی رگ با گرفتگی ۸۰ درصد



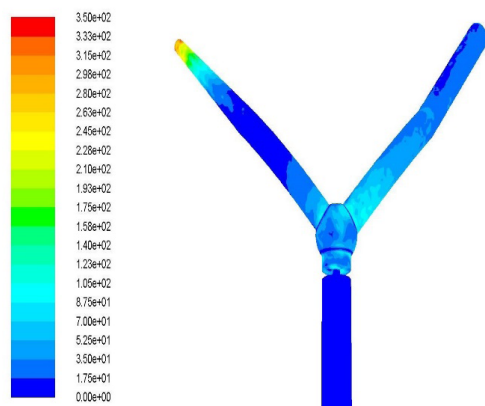
شکل ۷: نمودار تنش برشی روی دیواره‌ی داخلی برای اعتبارسنجی

۳-۱۲- شبیه‌سازی گرفتگی رگ

در شکل ۸، هندسه‌ی تولیدشده برای حالت گرفتگی نصف قطر رگ آورده شده است. در این شبیه‌سازی، شکل گرفتگی به صورت دایره‌ای فرض شده است.



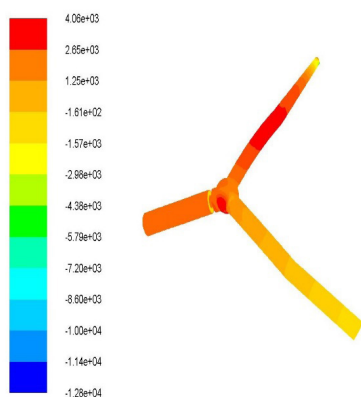
شکل ۸: هندسه‌ی رگ با گرفتگی ۵۰ درصد قطر رگ



شکل ۱۰: مقادیر تنش برشی روی دیواره‌ی هندسه‌ی رگ با تنگ‌شدگی خروجی

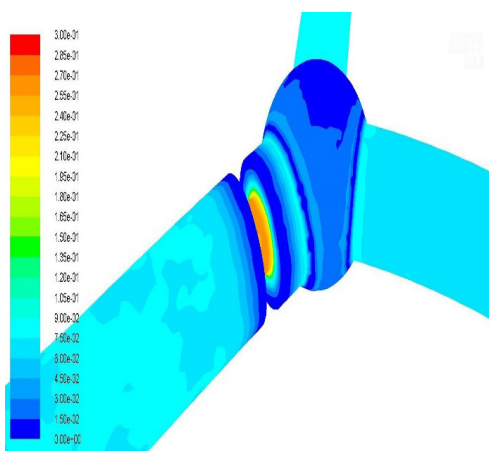
در شکل ۱۱، مقادیر تنش برشی روی دیواره‌ی هندسه با گرفتگی ۸۰ درصد با انتهای ۵۰ درصد آورده شده است. مشاهده می‌شود که تنش برشی در ناحیه‌ی نزدیک انشعاب و همچنین نزدیک گرفتگی از بالاترین میزان برخوردار است؛ علت آن هم در افزایش فشار در این نواحی می‌باشد. با تنگ‌تر شدن گرفتگی به دلیل تغییر قطر ناگهانی، سرعت در مجرای تنگ‌شده به شدت افزایش می‌یابد که این افزایش سرعت فشار بیشتری به دیواره وارد می‌کند و با تنگ‌تر شدن خروجی، این فشار افزایش می‌یابد. تنش در این نقاط به دلیل افزایش فشار زیاد می‌شود. تمرکز بیشترین تنش در بعد از گرفتگی و در ناحیه‌ی دوراهی است.

نتایج تحلیل به صورت مقادیر تنش برشی نزدیک دیواره‌ی رگ آورده شده است. در شکل‌های ۹ و ۱۰، مقادیر تنش برشی داخل رگ حاصل از تحلیل با مدل کارو مشاهده می‌شود. متوسط مقادیر نزدیک دیواره‌ی رگ، حدود نیم پاسکال می‌باشد. مشاهده می‌شود که در حالت گرفتگی، بیشترین تنش برشی در ناحیه‌ی پشت گرفتگی است. خروجی جریان نیز دارای مقادیر تنش برشی می‌باشد و این تنش با تنگ‌شدن مجرای خروجی افزایش می‌یابد.



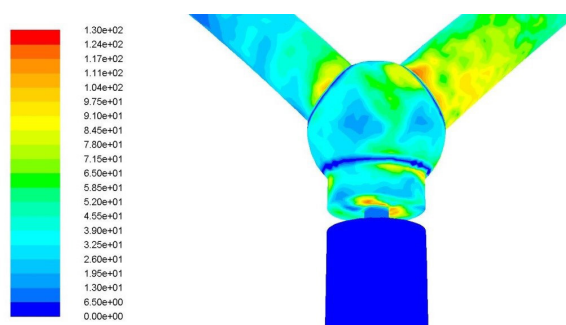
شکل ۱۳: مقادیر فشار داخل رگ برای هندسه با گرفتگی نصف قطر رگ و نصف خروجی اولیه

در شکل ۱۴، مقادیر تنش برشی در ناحیه‌ی نزدیک گرفتگی آورده شده است. مقادیر تنش برشی در نزدیکی گرفتگی رگ با گرفتگی ۵۰ درصد قطر رگ برحسب پاسکال است. این مقادیر نشان‌دهنده‌ی این است که فشار گرفتگی بر روی ناحیه‌ی اطراف آن تأثیر می‌گذارد و متمرکز می‌شود. تنش با توجه به میزان گرفتگی تغییر می‌کند و این تنش هنگام تنگ‌تر شدن مجرا به بیشترین حد خود می‌رسد.



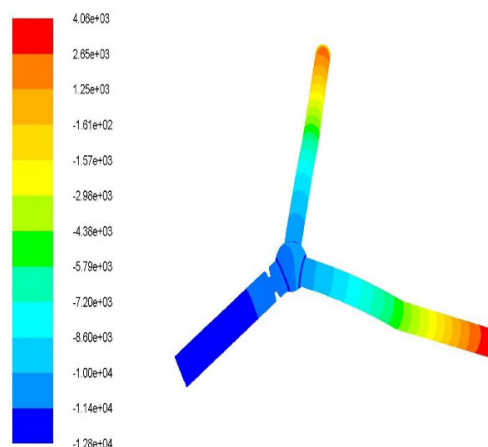
شکل ۱۴: مقادیر تنش برشی در نزدیکی گرفتگی رگ با گرفتگی نصف قطر رگ برحسب پاسکال

با وجود گرفتگی، ناهم‌گونی فشار و سرعت به شدت داخل رگ افزایش می‌یابد که موجب می‌شود در نواحی نزدیک گرفتگی مقادیر تنش برشی بیشتر شود و جریان دیواره‌ی رگ را تحت فشار قرار دهد. با وجود گرفتگی، مقادیر فشار در پشت گرفتگی به گونه‌ای متمرکز است تا راه



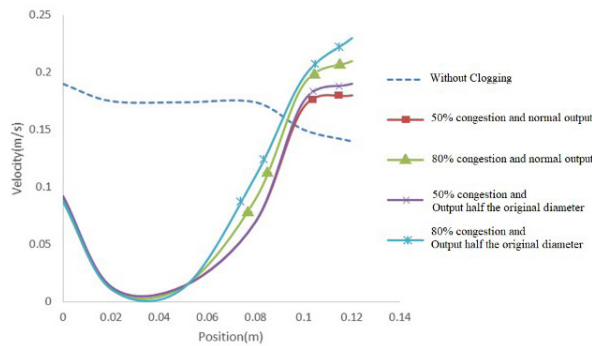
شکل ۱۱: مقادیر تنش برشی روی دیواره‌ی هندسه‌ی رگ با گرفتگی ۸۰ درصد با انتهای ۵۰ درصد

در شکل ۱۲، مقادیر فشار رگ نشان داده شده است. توزیع فشار بر اساس معادله‌ی ورودی داده شده برای رگ، همان‌گونه که مشاهده می‌شود، در خروجی بیشتر و در ورودی کمتر است. با وجود گرفتگی، ناهم‌گونی فشار و سرعت داخل رگ دیده می‌شود که باعث می‌گردد در نواحی نزدیک گرفتگی مقادیر تنش برشی بیشتر شود.

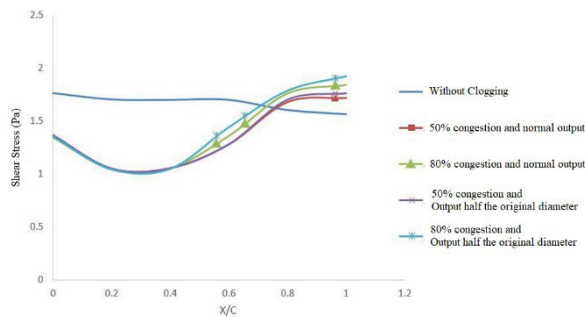


شکل ۱۲: مقادیر فشار رگ برای هندسه با گرفتگی نصف قطر رگ

در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود هنگامی که خروجی رگ تنگ‌تر می‌گردد، مقادیر توزیع فشار نیز تحت تأثیر قرار می‌گیرد و در میانه‌ی لوله‌ی خروجی، فشار به بیشترین حد می‌رسد که در مقایسه با حالت خروجی عادی، این تغییر فشار در میانه‌ی رگ قابل توجه است. تنگ‌تر شدن مجرا عامل اصلی فشار در این ناحیه از شکل می‌باشد.



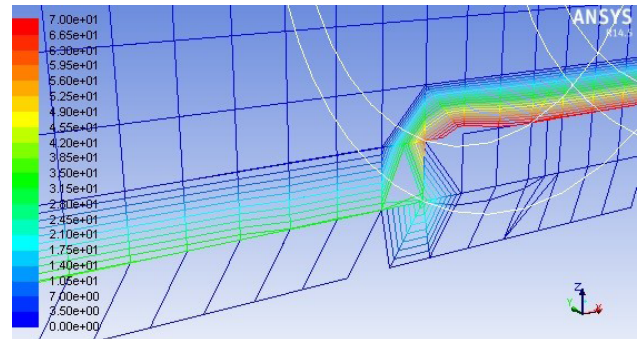
شکل ۱۶: مقادیر سرعت قبل از دوراهی جریان برای حالت‌های مختلف همان‌طور که از مقادیر فشار مشاهده می‌شود، تأثیر فشار در درون تمام بافت دیواره‌ی رگ نیز مشهود است. مقادیر تنش برشی شبکه‌ی دیواره بر اثر این فشار در شکل ۱۷ آورده شده است. در این حالت، بافت دیواره تحمل این مقدار فشار را نخواهد داشت و در آستانه‌ی پارگی قرار خواهد گرفت. همان‌طور که از مقادیر تغییر شکل مشاهده می‌شود، تأثیر فشار در درون بافت دیواره‌ی رگ نیز مشهود است؛ با افزایش میزان تنگ‌شدگی فشار زیاد می‌شود.



شکل ۱۷: مقادیر تنش برشی قبل از دوراهی جریان روی دیواره برای حالت‌های مختلف

در شکل ۱۸، مقادیر تغییر شکل در داخل رگ برای حالت‌های مختلف تحلیل آورده شده است. همان‌طور که در تحلیل‌های قبل آورده شده است، با نزدیک‌شدن به ناحیه‌ی قبل از گرفتگی، به دلیل افزایش فشار، جریان با افت شدید سرعت مواجه می‌شود که در ناحیه‌ی گرفتگی

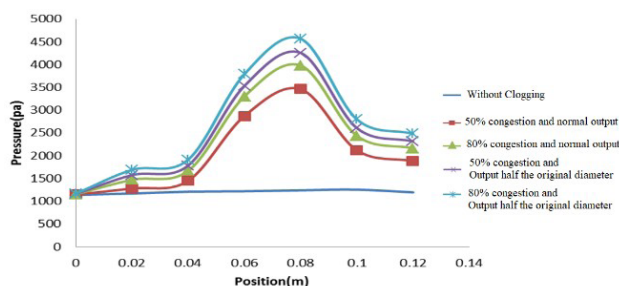
گرفتگی باز شود. همین مسئله باعث تغییر شکل شبکه‌ی اطراف مانع می‌شود. تغییر شکل شبکه‌ی دیواره بر اثر این فشار در شکل ۱۵ آورده شده است. در این حالت، بافت دیواره تحمل این مقدار فشار را نخواهد داشت و مقادیر سرعت و فشار نشان‌دهنده‌ی عدم ایستایی رگ است.



شکل ۱۵: تغییر شبکه در دیواره‌ی هندسه‌ی رگ با گرفتگی ۲۰ درصد قطر رگ

در شکل ۱۶، مقادیر سرعت در داخل رگ برای حالت‌های مختلف تحلیل آورده شده است. با نزدیک‌شدن به ناحیه‌ی قبل از گرفتگی، به دلیل افزایش فشار، جریان با افت شدید سرعت مواجه می‌شود که در ناحیه‌ی گرفتگی جریان همچون جریان داخل نازل عمل می‌کند و سرعت بیشتری در جریان ناحیه‌ی گرفتگی مشاهده می‌شود. این افزایش سرعت تا ناحیه‌ی دوراهی ادامه می‌یابد که موجب افزایش مقادیر اصطکاک و تنش برشی می‌شود. در حالتی که خروجی رگ دارای تنگ‌شدگی باشد، افزایش سرعت بیشتر شده و تا ۱۲ درصد سرعت بیشتری در ناحیه‌ی دوراهی مشاهده می‌شود. با افزایش سرعت، میزان فشار و تنش برشی افزایش می‌یابد و رگ توانایی تحمل این فشار را ندارد و در آستانه‌ی پارگی قرار می‌گیرد.

مختلف تحلیل آورده شده است. با نزدیک شدن به ناحیه‌ی قبل از گرفتگی، به دلیل افزایش فشار، جریان با افزایش فشار مواجه می‌شود که در ناحیه‌ی گرفتگی جریان همچون جریان داخل نازل عمل می‌کند و فشار بیشتری در جریان ناحیه‌ی گرفتگی مشاهده می‌شود. این افزایش فشار تا ناحیه‌ی دوراهی ادامه می‌یابد که موجب افزایش مقادیر اصطکاک و تنش برشی می‌شود. در حالتی که خروجی رگ دارای تنگ‌شدگی باشد، این افزایش فشار بیشتر شده و تا ۱۴ درصد فشار بیشتری در ناحیه‌ی دوراهی مشاهده می‌شود. همان‌طور که از مقادیر فشار مشاهده می‌شود، تأثیر فشار در درون تمام بافت دیواره‌ی رگ نیز مشهود است. گرفتگی موجب افزایش شدید فشار داخل رگ در محل قبل از گرفتگی می‌شود.



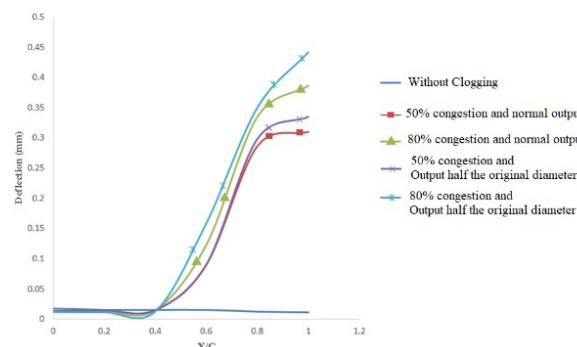
شکل ۱۹: مقادیر تغییرات فشار در مرکز رگ

۴- نتیجه‌گیری

رابطه‌ی تنش - کرنش در خون از یک رابطه‌ی واحد پیروی نمی‌کند. این تحلیل به ابعاد رگ در مقایسه با ابعاد ذرات (گلبول‌های خون، گلبول‌های سفید و پلاکت‌ها) موجود در پلاسمای خون بستگی دارد. فرض نیوتنی بودن جریان خون برای جریان‌های با کرنش برشی بالا مورد قبول است که این امر برای جریان در طول رگ‌هایی با قطر داخلی بزرگ صادق است.

به منظور دستیابی به اهداف تحقیق، ابتدا به مروری

جریان همچون جریان داخل نازل عمل می‌کند و سرعت بیشتری در جریان ناحیه‌ی گرفتگی مشاهده می‌شود. این افزایش سرعت تا ناحیه‌ی دوراهی ادامه می‌یابد که باعث افزایش مقادیر اصطکاک و تنش برشی می‌شود. در حالت گرفتگی ۸۰ درصد و خروجی تنگ‌شده به اندازه‌ی نصف قطر، بیشترین مقدار تغییر شکل رگ مشاهده می‌شود.



شکل ۱۸: تغییر شکل در دیواره‌ی هندسه‌ی رگ برای گرفتگی‌های رگ با ابعاد مختلف نسبت به قطر رگ

بر اثر جریان داخل رگ و تغییرات نوسانی سرعت و فشار، دیواره‌ی رگ تحت تغییر شکل قرار می‌گیرد. سیال مورد نظر که خون می‌باشد، یک سیال غیرنیوتنی است که رفتار سیال تحت مدل‌های مذکور در بخش قبل تحلیل شده است. دیواره‌ی رگ نیز به صورت الاستیک فرض شده است. اثر فشار سیال بر دیواره، موجب تغییر شکل دیواره‌ی رگ می‌شود. در شبیه‌سازی، اندرکنش دو فاز جامد و سیال مورد نظر است که این اندرکنش به وسیله‌ی شبکه‌ی تولیدشده برای هر دو ناحیه‌ی جامد و سیال و استفاده از مدل شبکه‌ی متحرک انجام شده است. نرم‌افزار توانایی شبیه‌سازی پارگی رگ بر اثر افزایش فشار داخلی را ندارد، اما از بیشینه‌ی تنش برشی که از حد تحمل رگ در ناحیه‌ای مثل آئورت بیشتر است، می‌توان پارگی رگ را در گرفتگی ایجادشده نتیجه گرفت.

در شکل ۱۹، مقادیر فشار در داخل رگ برای حالت‌های

افزایش فشار، جریان با افت شدید سرعت مواجه می‌شود که در ناحیه‌ی گرفتگی جریان همچون جریان داخل نازل عمل کرده و سرعت بیشتری در جریان ناحیه‌ی گرفتگی مشاهده می‌شود. این افزایش سرعت تا ناحیه‌ی دوراهی ادامه می‌یابد که موجب افزایش مقادیر اصطکاک و تنش برشی می‌گردد. در حالتی که خروجی رگ دارای تنگ‌شدگی باشد، افزایش سرعت بیشتر شده و تا ۱۲ درصد سرعت بیشتری در ناحیه‌ی دوراهی مشاهده می‌گردد. در این حالت، بافت دیواره تحمل این مقدار فشار را نخواهد داشت و در آستانه‌ی پارگی قرار خواهد گرفت.

۵- فهرست علائم

علائم انگلیسی

+Dw	بخش مثبت معادله‌ی تقاطع انتشار
ds	شتاب محلی جامد
F	نیروی خارجی
fsB	نیروهای حجمی بر واحد حجم
g	شتاب جاذبه
Gk	تولید انرژی جنبشی ناشی از گرادیان سرعت
G ω	تولید ω
I	تانسور همانی
I1	اولین متغیر سمت چپ تانسور کوچی - گرینو
P	فشار استاتیکی
Yk	اتلاف k به دلیل وجود آشفتگی

بر کارهای انجام‌شده بر روی جریان خون در رگ‌ها پرداخته شده است. در قسمت اول، به فعالیت‌های عددی انجام‌شده در این زمینه پرداخته شده که در این قسمت، تمرکز اصلی بر روی تحقیقات انجام‌شده با استفاده از نرم‌افزار انسیس می‌باشد. در قسمت دوم، به فعالیت‌های آزمایشگاهی انجام‌گرفته‌شده بر روی جریان خون پرداخته شده و سپس معادلات حاکم تشریح شده است. در ادامه، مدل رگ برای اعتبارسنجی داده‌های شبیه‌سازی از روی مقالات معتبر انتخاب شده و نتایج نشان‌دهنده‌ی صحت تقریبی مدل غیرنیوتنی مورد استفاده است. در ادامه‌ی پژوهش، مدل گرفتگی رگ با اندازه‌های مختلف گرفتگی تحلیل شده است. در این مقاله، فرض گرفتگی به صورت دایره‌ای است. تغییر شکل شبکه‌ی دیواره بر اثر فشار، نشان داده که بافت دیواره تحمل فشار در گرفتگی‌های شدید را نخواهد داشت و در آستانه‌ی پارگی قرار خواهد گرفت. همچنین تأثیر فشار در درون بافت دیواره‌ی رگ مشهود است. برای مقادیر کم گرفتگی، رگ‌های بزرگ تحمل فشار را خواهند داشت. هرچند نرم‌افزار توانایی شبیه‌سازی پارگی را ندارد، اما قدرت آستانه‌ی تحمل فشار بافت دیواره نشان‌دهنده‌ی این مطلب است که تا ۵۰ درصد قطر گرفتگی قابل تحمل است. مقادیر فشار در رگ با گرفتگی ۸۰ درصد قطر داخلی و خروجی تنگ‌شده نشان‌دهنده‌ی ناهم‌گونی فشار و سرعت با شدت زیاد در داخل رگ است که موجب می‌گردد در نواحی نزدیک گرفتگی مقادیر تنش برشی به میزان قابل توجهی زیاد شود و جریان، دیواره‌ی رگ را تحت فشار قرار دهد. تغییر شکل شبکه‌ی دیواره بر اثر این فشار نشان داده که در این حالت بافت دیواره تحمل این مقدار فشار را نخواهد داشت و در آستانه‌ی پارگی قرار خواهد گرفت. مقادیر سرعت در داخل رگ برای حالت‌های مختلف تحلیل آورده شده است. با نزدیک‌شدن به ناحیه‌ی قبل از گرفتگی، به دلیل

Med Assoc 241 : 2035-2038.

[3] Shikawa T, Guimaraes LFR, Oshima S, Yamane R (1998) Effect of non-newtonian property of blood on flow through a stenosed tube. Fluid Dyn Res 22:251-264.

[4] Nichols WW, O'Rourke MF (1998) McDonald's blood flow in arteries: theoretical, experimental and clinical principles. 4th edn. Oxford University Press, London.

[5] Rutten MCM (1998) Fluid-solid interaction in large arteries. PhD thesis, Technische Universiteit Eindhoven.

[6] Biswas D, Laskar RB (2011) Steady flow of blood through a stenosed artery: a non-newtonian fluid mode. Phys Sci Technol 7:144-153.

[7] Chaichana T, Sun Z, Jewkes J (2013) Computation of hemodynamics in the left coronary artery with variable angulations. J. Biomech 44:1869-1878.

[8] Alishahi M, Alishahi MM, Emdad H (2011) Numerical simulation of blood flow in a flexible stenosed abdominal real aorta. Sci Iran 18(6):1297-1305.

[9] Toloui M, Firoozabadi B, Saidi MS (2012) A numerical study of the effects of blood rheology and vessel deformability on the hemodynamics of carotid bifurcation. Sci Iran 19(1):119-126.

[10] Jingliang D, Zhonghua S, Kiao I, Jiyuan Tu (2013) Fluid-structure interaction analysis of representative left coronary artery models with different angulations. Computing in Cardiology 40:5-8.

[11] Seo T (2013) Hemodynamic characteristics in the human carotid artery model induced by blood-arterial wall interactions. Int J Biol Biomed Eng 7(5):215-220.

[12] Ghenaat A, Ramiyar A, Ranjbar AA, Domiri

$Y\omega$ اتلاف ω به دلیل وجود آشفتگی

y فاصله‌ی بدون بعد تا دیواره

علائم یونانی

τ تانسور تنش

μ لزجت مولکولی

Γk انتشار مؤثر K

$\Gamma \omega$ انتشار مؤثر ω

σk عدد پرانتل آشفتگی برای K

$\sigma \omega$ عدد پرانتل آشفتگی برای ω

μt لزجت آشفتگی

Ω_{ij} نرخ متوسط تانسور چرخش

$*\alpha$ ضریب میراکننده‌ی لزجت آشفتگی

ρs چگالی دیواره‌ی شریان

τs تانسور تنش جامد

$\psi 1$ چگالی انرژی کرنشی

۶-مراجع

[1] Nathan DM (2015) Long term complications of diabetes mellitus. N Engl J Med 328:1676-1685.

[2] Kennel WB, McGee DL (1979) Diabetes and cardiovascular disease: the framingham study. J. Am

- (2019) Numerical simulation of red blood cell motion and deformation using improved lattice Boltzmann-immersed boundary method. *Iranian J. Sci. Tech. Transactions of Mech. Eng* 43:57-73.
- [19] Qiao Y, Zeng Y, Ding Y, Fan J, Luo K, Zhu T (2019) Numerical simulation of two-phase non-newtonian blood flow with fluid-structure interaction in aortic dissection. *Comput Methodes Biomech Biomed Engin* 22(6):620-630.
- [20] Vasconcellos GLF, de Oliveira A, Queiroz MD, Júnior JL, Maia CB (2020) Flow past a circular cylinder: a comparison between commercial finite volume and finite element codes. *Adv Sci Eng Med* 12:815–824.
- [21] Ito Y, Cho I, Sakai Y, Iwano K (2021) CFD study on the efficacy of flow diverter stent placement for cerebral aneurysms. *J Appl Fluid Mech* 14(5):1547-1558.
- [22] Collyer AA (1993) *Techniques in rheological measurements*. 1st edn. Springer, Sheffield.
- [23] Macosko CW (1996) *Rheology: Principles Measurements and Applications*. 1st edn. VCH Munich,.
- [24] Hoseinieh farahani M (2008) *Numerical Analysis of Unsteady Blood Flow in Arteies with Flexible wall Using SPH Method*. PhD thesis, University of Guilan, (In Persian).
- [25] Yousefi ghaleroudkhani M (2012) *Numerical Analysis of Unsteady Blood Flow in Arteies with Flexible wall Using FPM Method*. PhD thesis, University of Guilan, (In Persian).
- Ganji D, Momeni M (2013) Numerical simulation of non-Newtonian blood flow in a vein with a bypass in the presence of a magnetic field. 15th Fluid Dynamics Conference, Bandar Abbas, (In Persian).
- [13] Abdul Khader SM, Ayachit A, Raghuvir Pai B, Ahmed KA, Rao VR K, Ganesh Kamath S (2014) FSI simulation of increased severity in patient specific common carotid artery stenosis. 3rd International Conference on Mechanical, Electronics and Mechatronics Engineering 14:19-20.
- [14] Van Leeuwen-van Zaanea F, De Bruijn HS, Van der Ploeg-van den Heuvela A, Sterenborga HJMC, Robinsonb DJ (2014) The effect of fluence rate on the acute response of vessel diameter and red blood cell velocity during topical 5-aminolevulinic acid photodynamic therapy. *Photodiagn Photodyn Ther* 11:71–81.
- [15] Pielhop K, Klaas M, Schröder W (2015) Experimental analysis of the fluid-structure interaction in finite-length straight elastic vessels. *Eur J Mech B Fluids* 50:71–88.
- [16] Nemati S, Ghassemi M, Shahidian A (2017) Numerical investigation of non-uniform magnetic field effects on the blood velocity and magnetic nanoparticles concentration inside the vessel. *Journal of Mechanical Science and Technology* 31(4):1657-1663.
- [17] Botti L, Paliwal N, Counti P, Antiga L, Meng H (2018) Modeling hemodynamics in intracranial aneurysms: comparing accuracy of CFD solvers based on finite element and finite volume schemes. *Int J Numer Methods Biomed Eng* 34.
- [18] Hassanzadeh A, Pourmahmoud N, Dadvand A

مطالعه‌ی عددی المان گسسته در شناسایی اثر متغیرهای محرک ارتعاشی بر رفع گرفتگی و تخلیه‌ی سیلوی حاوی مواد دانه‌ای

اکبر جعفری^{۱*}، علی ابول قندی^۲، آرش قریبی^۲

۱- گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تهران، ایران.

۲- دانشکده‌ی مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی سیرجان، سیرجان، ایران.

چکیده

رژیم جریان خروجی سیلوه‌ها تحت تأثیر متغیرهای مختلفی، از جمله ویژگی‌های هندسی آن، جنس و اندازه‌ی ذرات و تجهیزات تسهیل‌کننده‌ی جریان قرار دارد. در این تحقیق، از روش المان گسسته جهت شبیه‌سازی و مطالعه‌ی اثر ارتعاشات ناشی از نصب ویبراتور بر جریان خروجی سیلوی حاوی مواد دانه‌ای استفاده شده است. جهت اطمینان به دقت محاسبات، آنالیز حساسیت به فاکتورهای حل عددی صورت پذیرفت. همچنین جهت اعتبارسنجی، مقایسه‌هایی با نتایج تجربی و عددی موجود در مراجع انجام شده است. مشاهده‌ی شرایط واقعی نشان می‌دهد که وقتی دهانه‌ی سیلو به اندازه‌ی کافی بزرگ نیست، سیلو دچار انسداد می‌شود. در این تحقیق، با انجام تعدادی شبیه‌سازی، آستانه‌ی اندازه‌ی دهانه که منجر به انسداد می‌شود تعیین گردید و به عنوان اندازه‌ی بحرانی نام‌گذاری شد. اندازه‌های بزرگ‌تر و کوچک‌تر از آن به ترتیب غیربحرانی و فوق‌بحرانی معرفی شدند و مطالعات بر روی این سه حالت صورت پذیرفت. مطالعات عددی تحریک ارتعاشی دیواره‌ی سیلو، به‌ازای فرکانس‌ها و دامنه‌های مختلف انجام شده است. به‌علاوه، جهت پی‌بردن به تأثیر محل نصب ویبراتور، شبیه‌سازی‌های لازم انجام شد و بر اساس نتایج عددی، وقتی محل آن در محدوده‌ی ۲۰٪ از ارتفاع پایین قیف تخلیه بوده، بیشترین تأثیر را داشته است. به‌عنوان نمونه‌ای دیگر از نتایج، مشخص شد که با افزایش فرکانس، ارتعاش میزان اثرگذاری ویبراتور تقویت می‌شود، هرچند با افزایش دامنه‌ی ارتعاش، تفاوت تأثیر فرکانس‌های مختلف کاهش می‌یابد. در رابطه با اثرگذاری هر کدام از متغیرهای مسئله، علاوه‌بر توضیح نظری، به تفسیر و چرایی فیزیکی آن‌ها نیز پرداخته شده است.

کلمات کلیدی:

سیلو، انسداد، مواد دانه‌ای، المان گسسته.

Effects of vibrator characteristics on unclogging and outflow of silo containing granular material-DEM approach

Akbar Jafari^{1*}, Ali Abolghandi² and Arash Gharibi²

1-Department of Mechanical Engineering, Technical and Vocational University, Tehran, Iran.

2-Faculty of Mechanical Engineering, Sirjan University of Technology, Sirjan, Iran.

Abstract

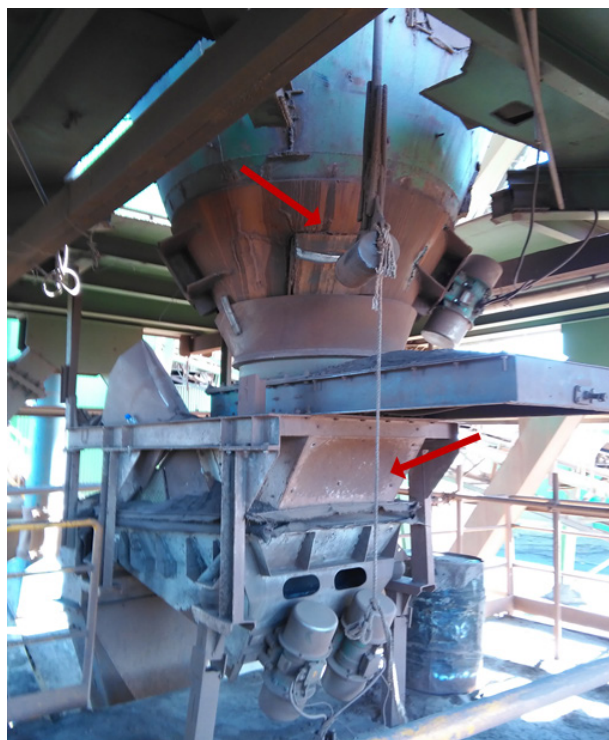
The output flow regime of the silo is influenced by different variables including its geometrical features, type and size of particles and flow aid devices. In this research, the Discrete Element Method (DEM) has been used to simulate and study effects of vibration, caused by installing a vibrator, on the output flow of silos containing granular materials. In order to ensure the accuracy of the simulations, the sensitivity analysis was performed on the numerical solution factors. For validation, comparisons with experimental and numerical results available in the open literature have been made. Observing the real conditions shows that when the opening of the silo is not large enough, the silo becomes blocked. Here, by performing a number of simulations, the opening size threshold at which the silo becomes blocked was determined and named as the critical size. Sizes larger and smaller than that threshold were introduced as non-critical and super-critical respectively, and numerical studies were carried out on these three cases. Numerical studies have been done for different values of the vibration frequency and amplitude. Moreover, to find out effects of the vibrator location, relevant stimulations were conducted, and based on the obtained results, when its location was within 20% of the bottom height of the discharge funnel, it had the greatest effect. As another conclusion, it was found that by increasing the vibration frequency, the impact of the vibrator increases however, the difference in the effects of different frequencies decreases with the increase of the vibration amplitude. Regarding effects of the studied variables, in addition to the theoretical explanation, their physical interpretation and reasoning has also been discussed.

Keywords

Silo; Blockage; granular material; DEM.

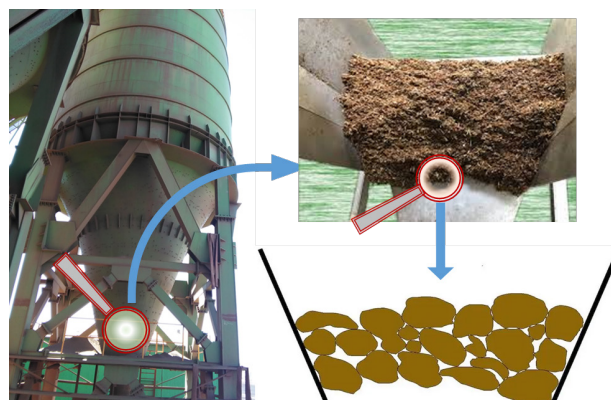
۱-مقدمه

سیلو یک تجهیز جهت ذخیره‌ی مواد دانه‌ای در بسیاری از صنایع، از جمله صنایع کشاورزی، مواد غذایی، معدنی، سیمان، پتروشیمی و دارویی است. تجهیز مذکور شامل یک محفظه‌ی بزرگ ذخیره و یک یا چند دریچه‌ی تخلیه است. همان‌گونه که در شکل ۱ نشان داده شده، گرفتگی (انسداد) خروجی سیلو یک مشکل متداول است که به علت چسبندگی ذرات یا قفل‌شدگی آن‌ها و تشکیل سقف قوسی در ناحیه‌ی خروجی رخ می‌دهد. کاربران در عمل روش‌های مختلفی، همچون ضربه‌زدن و نصب ویبراتورها برای غلبه بر این مشکل اجرا کرده‌اند که البته عدم اجرای مؤثر آن‌ها، باعث عدم کارایی و حتی تخریب سیلو مشابه نمونه‌های شکل ۲ می‌گردد. با توجه به حادثه‌ی این مشکل، موضوع آن دارای ارزش و اهمیت کاربردی بوده و از این‌رو مورد توجه محافل علمی و صنعتی قرار گرفته است. جهت یافتن راهکارهای مؤثر برای غلبه بر این مشکل، تحقیقات متنوعی با رویکردهای تئوری و تجربی توسط پژوهشگران مختلف انجام و منتشر شده است که در ادامه برخی از آن‌ها مرور می‌شود.



شکل ۲- خرابی دیواره‌ی سیلو در اثر ضربه‌ی چکش با هدف رفع گرفتگی.

تحقیق جانسن (Janssen) در سال ۱۸۹۵، یکی از نخستین مطالعات در ارتباط با مطالعه‌ی جریان تخلیه‌ی سیلوها محسوب می‌شود [۱]. بورلو (Beverloo) و همکاران نیز با روش تجربی به مطالعه‌ی جریان خروجی سیلوها پرداختند [۲]. واکر (Walker) روابطی تقریبی برای تعیین فشار وارد بر دیواره‌های سیلو و پایداری قوس درون آن را ارائه کرد [۳]. والترز (Walters) با رویکردی تحلیلی، به بررسی تنش و فشار وارد بر دیواره‌های قائم سیلو پرداخت [۴]. مطالعه‌ی تجربی آرنولد (Arnold) و کادن (Kaaden) از اولین تحقیقات منتشرشده در رابطه با بررسی اثر ارتعاشات مکانیکی بر اصطکاک مؤثر بین دو جسم محسوب می‌شود [۵]. بر اساس نتایج تحقیق مذکور، ارتعاشات باعث تضعیف اثر اصطکاک شده و حرکت را تسهیل می‌نماید. در همین زمینه، جارت (Jarrett) و دنیس (Dennis) اصطکاک دیواره‌ی سیلو و اثر آن بر نرخ



شکل ۱- انسداد دهانه‌ی خروجی سیلو ناشی از تشکیل گنبد قوسی ذرات نزدیک دهانه‌ی خروجی.

هوا و مکان قرارگیری آن بر رژیم جریان و نرخ تخلیه‌ی سیلو بررسی شده است. آن‌ها نشان دادند که با افزایش نرخ دمنده، چسبندگی ذرات کاهش یافته و نرخ تخلیه افزایش می‌یابد، اما این تأثیر مثبت یک‌نواخت نبوده، بلکه به گونه‌ای بوده که بعد از گذر از یک مقدار حدی، تأثیر منفی داشته است. در تحقیقی دیگر در همین زمینه، لو (Lu) و همکاران مطالعاتی بر روی تأثیر دمنده بر روی جریان مواد چسبنده‌ی درون سیلو انجام داده‌اند [۱۳]. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که دمش هوا گرا دیان فشار مطلوب را در نزدیکی دهانه‌ی خروجی فراهم کرده و باعث به حرکت درآمدن ذرات می‌شود. حرکت ذرات در اثر نیروی دمش هوا به عنوان عامل احتمالی جدایش ذرات و جلوگیری از انسداد معرفی شده است.

در کنار روش‌های تحلیلی و تجربی، روش المان گسسته در سال‌های اخیر جایگاه مهمی در شبیه‌سازی مواد دانه‌ای پیدا کرده و در مدل‌سازی تجهیزات مرتبط با مواد دانه‌ای به کار رفته است [۱۴، ۱۵]. در رابطه با مدل‌سازی سیلو می‌توان به تحقیق گودا (Goda) و ابرت (Ebert) اشاره نمود [۱۶]. آن‌ها نتیجه گرفتند که تشکیل ناحیه‌ی سکون (مرده) در نواحی مجاور دیواره‌های سیلو، باعث کاهش نرخ جریان خروجی می‌شود. همچنین آن‌ها با بررسی فشار وارد بر دیواره‌های سیلوی مخروطی مشاهده کردند که پیک فشار در محل اتصال قیف به مخزن سیلو اتفاق افتاده و دلیل آن تغییر ناگهانی شیب در این محل بیان شده است. تحقیق لانگستون (Langston) و همکاران با روش المان گسسته به مطالعه‌ی اثر ارتعاشات بر روی جریان مواد درون سیلو پرداخته است [۱۷]. بر اساس نتایج تحقیق مذکور، ارتعاش یک زبانه‌ی درون سیلو با فرکانس بالا و دامنه‌ی کم می‌تواند مانع از تشکیل گنبد

تخلیه را مورد مطالعه قرار دادند [۶]. کیوینگ (Kiwing) و همکاران با به کارگیری روش تجربی، مطالعاتی بر روی تأثیر قطر خروجی سیلو بر تخلیه‌ی آن انجام دادند [۷]. زوریگوئل (Zuriguell) و همکاران با استفاده از روش آزمایشگاهی به بررسی اندازه‌ی قطر بحرانی سیلو برای دانه‌های شیشه‌ای، پلاستیکی، فولادی و سربی پرداختند [۸]. یوناک (Unac) و همکاران با روش‌های تجربی و تئوری اثر شیب، اندازه‌ی ذرات و قطر خروجی را مورد بررسی قرار داده و به این نتیجه رسیدند که با افزایش قطر خروجی، نرخ تخلیه افزایش می‌یابد و هرچه قطر ذرات کوچک‌تر باشد، جریان تقویت می‌شود [۹]. آن‌ها همچنین به این نتیجه رسیدند که هرچه شیب قیف افزایش پیدا کند، نرخ خروجی نیز افزایش می‌یابد. طی تحقیق ملمان (Mellmann) و همکاران که با روش تجربی انجام شده، تأثیر شکل ذرات بر روی جریان خروجی سیلو مورد مطالعه قرار گرفته است [۱۰]. آن‌ها با استفاده از عدد بی بُعد فرود (Fr) و همچنین فاکتور شکل که به صورت نسبت طول به عرض ذرات تعریف می‌شود، جریان تخلیه را مورد بررسی قرار داده‌اند. بر اساس نتایج آن تحقیق، جریان ذرات تحت تأثیر شکل و چسبندگی آن‌ها بوده و همچنین عدد فرود وابسته به خواص ذرات است و با افزایش فاکتور شکل، عدد فرود کاهش می‌یابد. ویلسون (Wilson) و همکاران با استفاده از روش تجربی، مطالعاتی بر روی سیلوی حاوی دانه‌های کروی از جنس شیشه و سرب انجام داده و قطر بحرانی سیلو را تعیین نمودند [۱۱]. از جمله تحقیقات تجربی انجام شده در زمینه‌ی به کارگیری ابزارهای کمکی جهت تخلیه سیلو، می‌توان به کار هوانگ (Huang) و همکاران اشاره نمود [۱۲]. طی آن مطالعه‌ی آزمایشگاهی، تأثیر میزان دمش

این تحقیق، امکان استفاده از روش المان گسسته در مدل‌سازی مسئله مورد استفاده قرار گرفته و کارایی آن ارزیابی می‌شود. از نقطه نظر کاربردی، تحقیق حاضر مستقیماً به رفع مشکل انسداد سیلوها می‌پردازد که بسیاری از صنایع، از جمله معادن، فولاد، سیمان و کشاورزی به آن مبتلا هستند و نتایج این تحقیق می‌تواند در این گونه موارد مفید واقع شود. در عین حال از جنبه‌ی نوآوری، باید گفت که تعداد نسبتاً کمی مقاله در این رابطه منتشر شده و هنوز این حوزه به تکامل نرسیده است. مطالعه‌ی اثر ارتعاش دیواره‌ها، به نحوی که در این تحقیق به آن پرداخته شده، جدید محسوب می‌شود. در عمل، بسیاری اوقات محل نصب و تنظیمات بهینه‌ی ویبراتور با روش سعی و خطا جستجو می‌شود که معمولاً زمان‌بر و پرهزینه است؛ لذا در اختیار داشتن نتایج این تحقیق می‌تواند در جهت کاهش میزان سعی و خطا در شرایط واقعی مفید واقع شود. به عنوان نمونه، در اینجا ثابت شد که در سیلوی با اندازه‌ی دهانه‌ی غیر بحرانی، نصب ویبراتور تأثیر قابل توجهی بر تقویت نرخ تخلیه‌ی آن ندارد. به عنوان مثالی دیگر مشخص شد که محل نصب ویبراتور باید تا حد ممکن به خروجی نزدیک باشد و دیواره انعطاف‌پذیری کافی‌ای برای ایجاد دامنه‌ی ارتعاش داشته باشد.

۲- تئوری و فرمول‌بندی

با توجه به اینکه مقرر است از روش المان گسسته استفاده شود، توضیحاتی در این رابطه در این بخش ارائه می‌گردد. در یک سیستم با N ذره، موقعیت، سرعت و نیروهای بین ذرات در لحظه‌ی t_0 مشخص است؛ بنابراین با انتگرال‌گیری از معادلات حرکت نیوتن که در زیر آمده،

قوسی پایدار درون سیلو شود و از طرفی، ارتعاش زبانه با فرکانس کم و دامنه‌ی زیاد تأثیر قابل توجهی بر روی جابه‌جاشدن مواد درون سیلو دارد. فرایگ (Fraige) و همکاران یک قیف دوبعدی حاوی ذرات چندوجهی را با روش المان گسسته مدل‌سازی نموده و نشان دادند که ارتعاشات تأثیر قابل توجهی بر ممانعت از انسداد خروجی قیف دارد [۱۸]. بر اساس نتایج مطالعات آن‌ها، هرچه محل ارتعاش از دهانه‌ی خروجی فاصله‌ی بیشتری داشته باشد، انرژی آن بیشتر هدر رفته و تأثیر آن بر جلوگیری از انسداد کاهش می‌یابد. طبق نتایج مرجع مذکور، فرکانس ارتعاش تأثیر محسوسی بر نرخ تخلیه ندارد، درحالی‌که دامنه‌ی ارتعاش تأثیر مستقیم قابل توجهی بر آن دارد. ماچت (Matchett) اثر ارتعاشات بر روی جریان درون قیف مرتعش را با روش تحلیلی مورد مطالعه قرار داده و یک رابطه‌ی ساده برای برآورد نرخ تخلیه ارائه داده است [۱۹]. موتلانو (Motellano) و همکاران با دو رویکرد آزمایشگاهی و المان گسسته، نرخ تخلیه و الگوی جریان از سیلوی آزمایشگاهی حاوی ذرات شیشه و همچنین سیلوی حاوی دانه‌های ذرت را مورد مطالعه قرار داده‌اند [۲۰]. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که هرچه ضریب اصطکاک بین ذرات افزایش پیدا کند، زمان تخلیه نیز افزایش می‌یابد. کوبیلکا (Kobylka) و مولندا (Molenda) انسداد سیلو با ناحیه‌ی خروجی مستقیم را به روش المان گسسته مورد مطالعه قرار دادند [۲۱]. آن‌ها با شبیه‌سازی بار اعمال‌شده توسط ذرات به اجزای درون سیلو و مطابقت آن با نتایج تجربی، بر روش کار خود صحه گذاشته‌اند.

از لحاظ ضرورت انجام این تحقیق، باید به دو حوزه‌ی تئوری و کاربردی اشاره نمود. در زمینه‌ی تئوری، با انجام

همچنین سرعت تغییر فرم بستگی دارد [۲۲]. درواقع رفتار اجسام برخوردکننده صرفاً الاستیک نبوده، بلکه از نوع ویسکوالاستیک است؛ بنابراین در تعیین نیروی برخورد از ترکیب مدل تنش‌های تماسی هرتز و مدل ویسکوالاستیک کلوین استفاده می‌شود. همان‌گونه که در شکل ۳ ملاحظه می‌شود، میزان لهیدگی برآیند، برابر ξ^k بوده که اگر ذرات کروی باشند، سطح تماس به‌صورت دایره‌ای به شعاع a درمی‌آید. اگر دو ذره تحت نیروی P به هم فشرده شوند، شعاع دایره‌ی لهیدگی از رابطه‌ی زیر به‌دست می‌آید [۲۳].

$$P = \frac{4E^* a^3}{3R^*} \longleftrightarrow a = \sqrt[3]{\frac{3R^* P}{4E^*}} \quad (۳)$$

در رابطه‌ی فوق، R^* و E^* به‌ترتیب شعاع مؤثر و ضریب الاستیک مؤثر می‌باشند و به‌صورت زیر تعریف می‌شوند.

$$\frac{1}{E^*} = \frac{1-\nu_i^2}{E_i} + \frac{1-\nu_j^2}{E_j} \quad (۴)$$

$$\frac{1}{R^*} = \frac{1}{R_i} + \frac{1}{R_j} \quad (۵)$$

در معادلات فوق، E_i و E_j مدل‌های یانگ و ν_i و ν_j ضرایب پواسن ذرات برخوردکننده می‌باشند. از طرفی، با استفاده از روابط هندسی، معادله‌ی زیر برای ارتباط بین میزان تداخل و لهیدگی به‌دست می‌آید.

$$a = (\xi R^*)^{1/2} \quad (۶)$$

بدین ترتیب با مشخص‌بودن موقعیت مرکز ذرات، مقدار ξ^k از رابطه‌ی (۵) به‌دست آمده و سپس با ترکیب روابط (۶) و (۳)، نیروی ناشی از تغییر شکل الاستیک وارد بر ذرات به‌دست می‌آید که متناسب با $E^*(R^*\xi^3)^{1/2}$ می‌باشد.

می‌توان موقعیت و سرعت همه‌ی ذرات را در زمان t_l که به اندازه‌ی بازه‌ی Δt بعد از t_0 است به‌دست آورد. با تکرار این فرآیند، مجموعه‌ی کاملی از اطلاعات در مورد موقعیت، سرعت، شتاب و انرژی تک‌تک ذرات در خلال زمان در اختیار قرار می‌گیرد.

$$\frac{\partial^2 \vec{r}_i}{\partial t^2} = \frac{1}{m_i} F_i(\vec{r}_j, \vec{v}_j, \varphi_j, \omega_j) \quad , (i, j=1, \dots, N) \quad (۱-الف)$$

$$\frac{\partial^2 \varphi_i}{\partial t^2} = \frac{1}{J_i} \vec{M}_i(\vec{r}_j, \vec{v}_j, \varphi_j, \omega_j) \quad , (i, j=1, \dots, N) \quad (۱-ب)$$

در معادلات فوق، $\vec{F}_i$ و $\vec{M}_i$ به‌ترتیب نیرو و گشتاور وارده به دانه‌ی i ام به جرم m_i و ممان اینرسی J_i هستند. نیروها و گشتاورها توابعی از موقعیت $\vec{r}_j$ ، وضعیت زاویه‌ای φ_j ، سرعت خطی $\vec{v}_j$ و سرعت زاویه‌ای ω_j دانه هستند. نیروی $\vec{F}_i$ شامل تمام نیروهایی می‌شود که در نتیجه‌ی تماس بین ذره و همسایگان آن به‌وجود می‌آید و در نقطه‌ی تماس دو ذره اعمال می‌گردد که نمایش ریاضی آن بدین صورت است:

$$\vec{F}_i = \sum_{j=1, j \neq i}^N \vec{F}_{ij} \quad (۲)$$

در رابطه‌ی بالا، $\vec{F}_{ij}$ معرف نیروی وارده از سوی دانه‌ی j ام به دانه‌ی i ام است. قابل ذکر است که نیروهای تماسی به جنس، شکل سطح تماس و سرعت نسبی در منطقه‌ی تماس بستگی دارند. به‌علاوه، این نیروها باعث ایجاد گشتاوری حول مرکز ذره‌ی مورد مطالعه می‌شود. یک بخش اساسی از تحلیل المان گسسته تعیین نیروی برخورد بین اجزاست. تاکنون مدل‌های مختلفی برای این منظور توسعه داده شده که هرکدام برای شرایط خاصی مناسب هستند. در اینجا از مدل ویسکوالاستیک کلوین هرتز برای این منظور استفاده می‌شود. بر مبنای این مدل، نیروی برخورد به جنس، میزان تغییر فرم و

با این اوصاف، نیروی نرمال بین دو ذره برخوردکننده از مجموع نیروی الاستیک و نیروی ویسکوز به صورت زیر تعیین می گردد [۲۴].

$$\epsilon = \exp\left(-\frac{\eta}{\sqrt{2m^*K_n - \eta^2}}\right) \quad (9)$$

$$F^n(\xi, \xi') = \frac{4E^*\sqrt{R^*}}{3} \left(\xi^{\frac{3}{2}} + \eta\sqrt{\xi\xi'} \right) \quad (7)$$

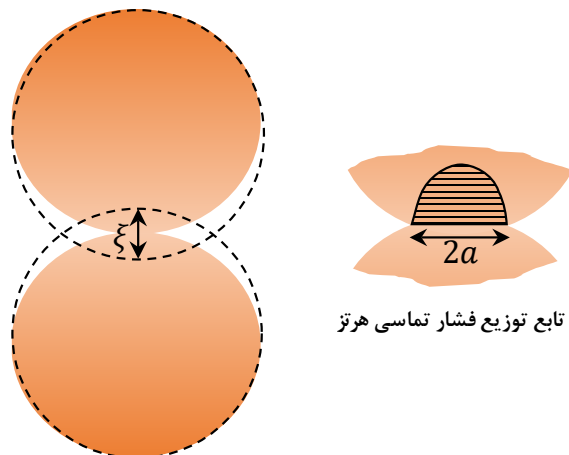
$$\frac{1}{m^*} = \frac{1}{m_i} + \frac{1}{m_j} \quad (10)$$

در معادله ی فوق، m^* جرم مؤثر مجموعه ی جفت ذره ی برخوردکننده بوده و K_n ضریب فنر الاستیک نرمال است که به تغییر فرم پذیری نرمال وابسته می باشد. البته معمولاً ضریب بازگشت با روش تجربی اندازه گیری شده و بر اساس آن می توان ضریب میرایی را محاسبه نمود.

در رابطه با نیروی مماسی نیز می توان تفسیری مشابه نیروی نرمال ارائه کرد. درواقع، کل نیروی مماسی برابر مجموع نیروی الاستیک و غیرالاستیک است، با این توضیح که معمولاً سهم نیروی اصطکاکی غیرقابل برگشت بیشتر از اثر الاستیک است، چراکه حرکت مماسی به یک طرف انجام شده و بازگشت پذیر نیست. باین حال متناسب با شرایط ذرات و نقطه ی تماس آنها، این نیرو می تواند از نوع ویسکوز یا اصطکاک خشک باشد. با این توضیحات، تابع نیروی مماسی به صورت زیر قابل بیان است [۲۴].

$$F^t = -\text{sign}(v_{rel}^t) \cdot \min\left(\gamma^t |v_{rel}^t|, \mu |F^n|\right) \quad (11)$$

در معادله ی فوق، v_{rel}^t مؤلفه ی مماسی سرعت نسبی، γ^t ضریب میرایی مماسی ویسکوز و μ ضریب اصطکاک مماسی خشک (کلومب) است. نیروی مماسی یکی از انواع ویسکوز یا خشک است که بر اساس معادله ی فوق، کوچک ترین از بین این دو در نظر گرفته می شود. بدیهی است که با توجه به تعداد زیاد معادلات دیفرانسیل حاکم،



شکل ۳- چگونگی تغییر شکل اجسام در تماس و تابع توزیع فشار

جمله ی دوم معادله ی فوق به ضریب میرایی درونی ماده، بستگی دارد. باین حال می توان از تعریف ضریب بازگشت، $0 \leq \epsilon \leq 1$ ، استفاده نمود و آن را به صورت ملموس تری بازنویسی کرد. این ضریب نماینده ی میزان بازگشت انرژی پس از برخورد است، به گونه ای که مقدار واحد آن نشان دهنده ی عدم وجود رفتار ویسکوز و عدم تلفات است. از نقطه نظر سینماتیکی، این ضریب برحسب نسبت سرعت نسبی نرمال بعد از برخورد، v_{rel}^{tn} ، به سرعت نسبی نرمال قبل از برخورد، v_{rel}^n ، به صورت زیر قابل بیان است.

$$\epsilon = \frac{v_{rel}^{tn}}{v_{rel}^n} \quad (8)$$



شکل ۴- نصب ویبراتور روی دیواره‌ی قیف تخلیه در شرایط واقعی.

در دنیای واقعی، با تغییر سرعت دوران موتور محرک دستگاه ویبراتور، فرکانس ارتعاش قابل تنظیم بوده و به طریقی مشابه می‌توان مقادیر مختلف فرکانس تحریک ارتعاشی را در دنیای شبیه‌سازی نیز اعمال نمود. در شرایط واقعی، دامنه‌ی ارتعاش جدای از وابستگی به فرکانس، به انعطاف‌پذیری ورق سازنده‌ی قیف و مقدار نیروی تحریک نیز وابسته است که البته با توجه به عدم امکان تغییر ورق سازه با مقدار جرم وزنه‌های دوار نابالانس، دامنه‌ی ارتعاش کنترل می‌شود. محدوده‌ی اثر ویبراتور و دامنه‌ی ارتعاش متناسب با سفتی ورق و نیروی تحریک است و با فاصله از محل تحریک کاهش می‌یابد. در دنیای شبیه‌سازی، امکان پیاده‌سازی دامنه‌ی ارتعاش و اثر محل نصب ویبراتور کاملاً منطبق با شرایط واقعی

امکان حل تحلیلی آن‌ها وجود ندارد و بایستی به صورت عددی حل شوند. در اینجا از الگوریتم پیش‌بینی - تصحیح گیر (Gear) برای این منظور استفاده می‌شود [۲۷]. جهت اجرای شبیه‌سازی‌های کامپیوتری، از برنامه‌ی منبع‌باز لایتس (LIGGGHTS) استفاده شده که درواقع نسخه‌ی بهبودیافته‌ی برنامه‌ی منبع‌باز لمپس (LAMMPS) است [۲۸]. برای این منظور، کدهای لازم تهیه گردید و جهت اجرای پایدار و استفاده از حداکثر ظرفیت محاسباتی، در سیستم‌عامل لینوکس نسخه‌ی اوبونتو برنامه‌ها اجرا شده است.

۳- مواد و روش کار

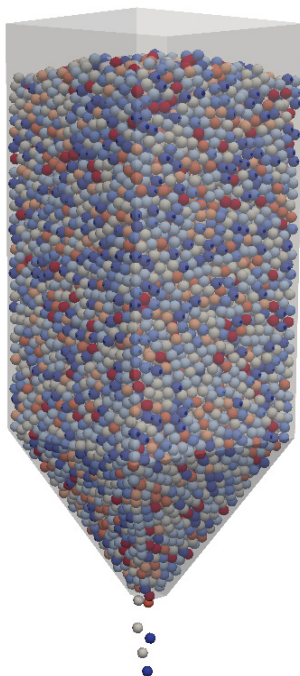
روش‌های مختلفی برای رفع گرفتگی سیلوها و شوت‌ها در عمل اجرا می‌شود، ولی میزان اثرگذاری و شرایط بهینه‌ی آن‌ها جای سؤال است. یکی از این روش‌ها نصب ویبراتور مطابق شکل ۴ روی دیواره‌ی قیف خروجی است که با ایجاد لرزش با فرکانس و دامنه‌ی مشخص، باعث جریان بهتر مواد در خروجی می‌شود. یک سؤال این است که ویبراتور در چه ناحیه‌ای از دیواره‌ی قیف تخلیه نصب گردد تا تأثیر بیشتری در رفع انسداد داشته باشد؟ در همین رابطه، باید به تأثیر فرکانس و دامنه‌ی ارتعاش بر میزان اثرگذاری ویبراتور پرداخته شود. درواقع، در پژوهش جاری، با شبیه‌سازی سیلو در شرایط مختلف، تأثیر هرکدام از پارامترهای فوق‌الذکر بر رفتار تخلیه‌ی سیلو مورد تحقیق قرار می‌گیرد.

جدول ۱- خواص مختلف دیواره و ذرات درون سیلو.

خواص	سمبل و واحد	ذرات	دیواره‌ی سیلو
چگالی	$(\rho) \text{ kg/m}^3$	۲۵۱۶	۱۱۶۳
سفتی	$(E) \text{ MPa}$	۴۱۰۰	۳۰۰۰
ضریب پواسون	ν	۰/۲۲	۰/۳۸
ضریب بازگشت	ϵ	۰/۷۵	۰/۶۲
ضریب اصطکاک	μ	۰/۳	۰/۳

جدول ۲- مشخصات هندسه‌ی سیلو و ذرات شبیه‌سازی.

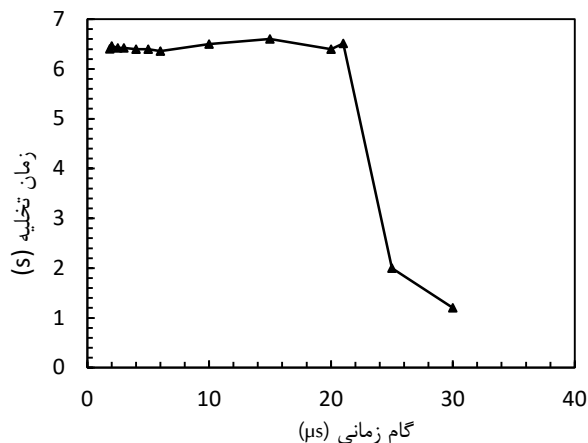
پارامترها	مقادیر
$L(m)$	۰/۲۵
$H(m)$	۰/۵
$\theta(^{\circ})$	۲۷/۵
$D(m)$	۵۷, ۴۲, ۳۲
قطر ذرات $d(mm)$	12.6 mm (10%), 13 mm (10%), 13.6 mm (25%), 14 mm (25%), 14.6 mm (10%), 15 mm (10%), 15.4 mm (10%)



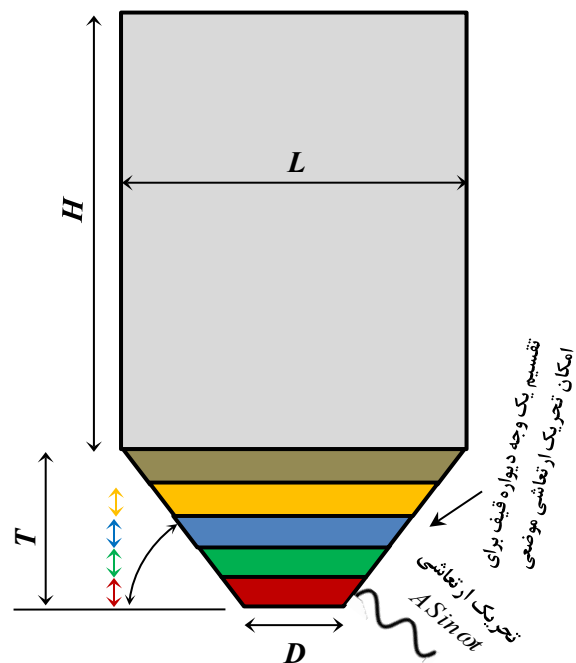
وجود ندارد، هرچند سعی شده تا حد زیادی به واقعیت نزدیک باشد. در این راستا، دیواره‌ی قیف سیلو مطابق شکل ۵ به چند ناحیه‌ی مستقل تقسیم شده و هر بار تحریک و جابه‌جایی هارمونیک قائم به یکی از این نواحی وارد شده است. با این کار، ناحیه‌ی اثر محدود می‌شود و می‌توان به مطالعه‌ی اثر محل نصب ویبراتور پرداخت. مواد انتخاب‌شده دانه‌هایی کروی‌ای از جنس شیشه هستند که مشخصات آن‌ها به صورت کامل در جدول ۱ آمده است. اندازه‌ی قطر ذرات در یک محدوده مطابق با توضیح درج‌شده در جدول ۲ بوده است. جنس بدنه‌ی سیلو از متاکریلیت (Methacrylate) است و خواص آن برگرفته از مقادیر ارائه‌شده در مرجع [۲۰] می‌باشد. دهانه‌ی سیلوی شبیه‌سازی‌شده مربعی با اندازه‌ی ضلع D بوده و مشخصات هندسی آن در جدول ۲ آمده است. بدیهی است با کاهش اندازه‌ی دهانه‌ی خروجی سیلو، احتمال انسداد آن افزایش می‌یابد، لذا آستانه‌ی اندازه‌ی که سیلو دچار انسداد شده و مواد به صورت خودکار از آن خارج نمی‌شود را اندازه‌ی بحرانی می‌نامیم. در اینجا با استناد به نتایج شبیه‌سازی سیلوهای با اندازه‌های مختلف دهانه‌ی خروجی، اندازه‌ی دهانه‌ی بحرانی $D_{cr} = 42 \text{ mm}$ به دست آمده است. بدین ترتیب اگر اندازه‌ی ضلع دهانه‌ی خروجی از این مقدار کمتر باشد، سیلو دچار انسداد است و بدون عامل کمکی، همچون ارتعاشات امکان تخلیه ندارد. در این تحقیق، شبیه‌سازی‌ها به‌ازای اندازه‌ی دهانه‌ی بحرانی، فوق‌بحرانی (دچار انسداد) و غیربحرانی انجام شده است. همان‌گونه که در شکل ۵ نشان داده شده، تحریک ارتعاشی با تحریک هارمونیک با تابع $x = A \cos \omega t$ بوده که در آن A اوج دامنه، ω فرکانس و آن برحسب rad/s و $f = \frac{\omega}{2\pi}$ فرکانس آن برحسب هرتز است.

۴-۱- آنالیز حساسیت به گام زمانی

برای مطالعه‌ی تأثیر گام زمانی، به‌ازای مقادیر مختلف آن، از ۱،۸۴ تا ۳۰ میکروثانیه، شبیه‌سازی‌های سیلویی با دهانه‌ی ۵۷ mm انجام و نتایج آن به‌صورت نمودار شکل ۶ به‌دست آمده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، وقتی گام زمانی کمتر از حدود ۵ میکروثانیه است، تفاوت چندانی در نتایج وجود ندارد و پس از آن اختلاف‌ها افزایش یافته و با عبور از ۲۰ میکروثانیه، تفاوت شدید رخ داده و زمان تخلیه کاهش قابل‌توجهی یافته است. در تفسیر این رفتار، دلایل مختلفی می‌توان برشمرد، ازجمله مشاهده و رصد گرافیکی ذرات نشان داد که برخلاف واقعیت برخی ذرات از دیواره‌ی جامد عبور کرده و در فضای آزاد قرار می‌گیرند که ذرات گم‌شده محسوب می‌شوند؛ این اتفاق می‌تواند ناشی از خطای محاسباتی در برآورد نیروی برخورد و به‌تبع آن شتاب، سرعت و موقعیت ذرات باشد. ازاین‌رو در اینجا گام زمانی کوچک ۱،۸۴ میکروثانیه در شبیه‌سازی‌ها استفاده شده که در محدوده‌ی پایداری نمودار آنالیز حساسیت به گام زمانی بوده است. البته این مقدار گام زمانی محافظه‌کارانه محسوب می‌شود؛ چراکه خیلی کوچک‌تر از مقداری است که منجر به کسب دقت کافی می‌گردد و هرچند هزینه‌ی محاسباتی را بالا برده، ولی می‌توان از دقت محاسبات در همه‌ی شرایط اطمینان داشت.



شکل ۶- نمودار حساسیت زمان تخلیه به گام زمانی.



شکل ۵- شماتیک و ابعاد سیلو به همراه تقسیم دیواره‌ی قیف و تصویری از یک لحظه از شبیه‌سازی المان گسسته.

۴- نتایج عددی و بحث

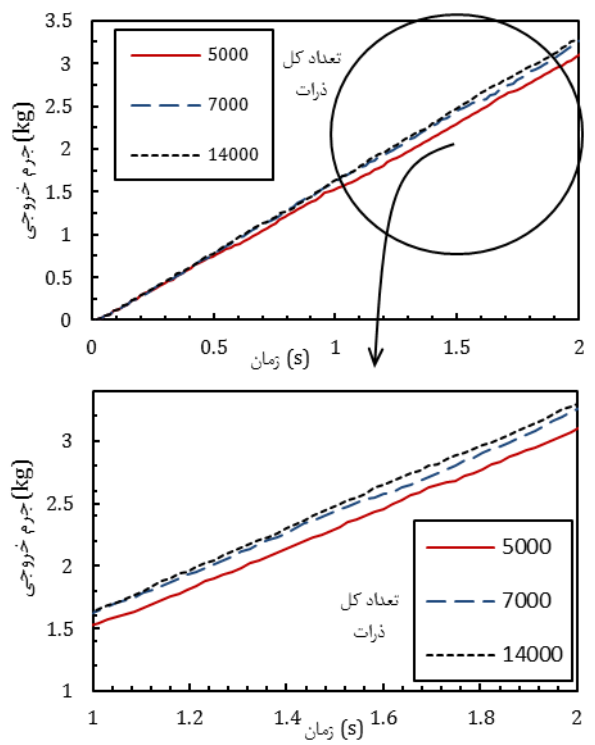
در شبیه‌سازی‌ها، در ابتدا طی بازه‌ی زمانی $t = 0.9$ s، تعداد ۱۴۰۰۰ ذره درون سیلوی بسته ریخته می‌شوند. طی زمان $t = 1.3$ s، تقریباً همه‌ی ذرات دچار سکون شده و برآیند انرژی جنبشی سیستم به سمت صفر میل می‌نماید و سپس درپچه‌ی تخلیه باز شده است. شبیه‌سازی‌ها به‌ازای مقادیر مختلف متغیرهای درج‌شده در جدول ۳ انجام شده است.

جدول ۳- پارامترهای شبیه‌سازی.

پارامترها	سمبل	مقادیر
فرکانس	$f(Hz) = \frac{\omega}{2\pi}$	۵۰۰، ۱۰۰۰، ۱۵۰۰، ۲۰۰۰ Hz
دامنه‌ی ارتعاش	$A (mm)$	۰، ۱، ۲، ۴، ۶، ۸، ۱۰، ۱۲
محل ویبراتور		$(0 - T)$ $(0 - 0.2T)$ $(0.2T - 0.4T)$ $(0.4T - 0.6T)$

۲-۴- آنالیز حساسیت به تعداد ذرات (ارتفاع مواد درون سیلو)

مقدار بار درون سیلو باید حداقل به اندازه‌ای باشد که نرخ جریان خروجی آن تقریباً مستقل از ارتفاع بار باشد [۶]. البته در مطالعات تجربی ثابت شده که در برخی مواد اگر ارتفاع بار بیش از یک برابر قطر سیلو باشد، ثبات نرخ تخلیه رخ می‌دهد و البته در عمده‌ی مواد، اگر ارتفاع بار بیش از دو برابر قطر باشد، قطعاً شرایط ثبات حاصل می‌گردد [۲۹]. در اینجا قبل از اجرای شبیه‌سازی‌های نهایی، تعدادی شبیه‌سازی به‌ازای مقادیر مختلف ارتفاع بار اجرا و اثر آن بر نرخ تخلیه‌ی سیلو مورد مطالعه قرار گرفت. شکل ۷ نمودارهای جرم خروجی برحسب زمان برای سیلو با دهانه‌ی ۵۷ mm به‌ازای مقادیر مختلف تعداد ذرات درون آن را نشان می‌دهد. بزرگنمایی نمودارها نشان می‌دهد که با افزایش تعداد ذرات، نوسانات کمتر شده و ثبات شیب نمودار که بیانگر نرخ تخلیه است، بیشتر شده است. می‌توان مشاهده نمود که هرچند افزایش تعداد دانه‌ها بر روی نرخ تخلیه تأثیرگذار بوده، ولی بعد از گذار از تعداد ۷۰۰۰، این نرخ تقریباً تثبیت شده، لذا در اینجا تعداد ذرات ۱۴۰۰۰ برای ادامه شبیه‌سازی‌ها در نظر گرفته شده است تا اطمینان کافی از ثبات جریان در تمامی حالات شبیه‌سازی وجود داشته باشد.

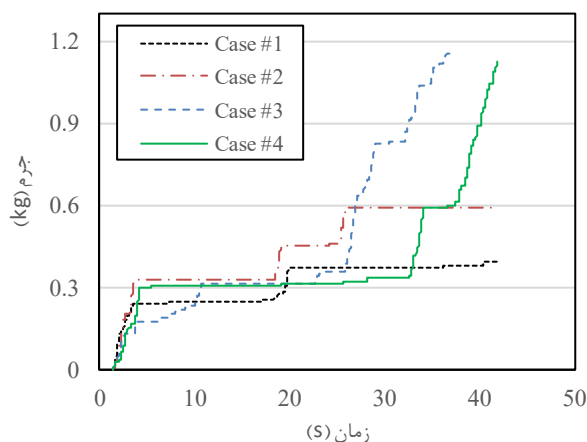


شکل ۷- نمودارهای جرم خروجی - زمان برای سیلو با دهانه‌ی ۵۷ mm به‌ازای مقادیر مختلف تعداد ذرات اولیه.

۳-۴- اعتبارسنجی

جهت اطمینان از فرآیند شبیه‌سازی و نتایج آن، مقایسه‌هایی با نتایج تجربی و همچنین شبیه‌سازی گزارش‌شده در مراجع صورت پذیرفت. واقعیت این است که نرخ تخلیه لحظه‌ای ثابت نبوده، بلکه حول یک مقدار متوسط نوسان می‌کند. یک مقایسه می‌تواند مربوط به مقدار متوسط نرخ تخلیه باشد که مطابق مقادیر درج‌شده در جدول ۴، تطابق قابل‌قبولی بین نتیجه‌ی حاضر و مقدار گزارش‌شده در مرجع وجود دارد. به عنوان شاخصی دیگر، مقادیر زمان کلی تخلیه‌ی سیلو حاصل از تحقیق حاضر و همچنین نتایج تجربی و شبیه‌سازی مرجع [۲۰] در جدول ۴ ارائه شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، زمان تخلیه توسط مرجع مذکور با روش شبیه‌سازی ۲۸,۳۶ s به‌دست آمده که در مقایسه با

مشاهده می‌شود که نظم و روال ثابتی در تخلیه سیلو به‌ازای دفعات مختلف شبیه‌سازی وجود ندارد. درحقیقت رفتار ذرات در شرایط واقعی متأثر از تماس آن‌ها با همدیگر بوده و به‌نوعی شرایط تصادفی بر آن حاکم است و باعث عدم وقوع شرایط یکسان در هر بار تخلیه سیلو می‌گردد. با این حال باید تأکید نمود که وقتی دهانه سیلو از حد بحرانی فراتر رود، انسداد رخ نداده و همان‌گونه که در شکل‌های ادامه‌ی این بخش آمده است، نمودارهای جرم - زمان تقریباً به‌صورت خطی با شیب نسبتاً ثابتی درمی‌آیند که بیانگر نرخ تخلیه است.



شکل ۸- نمودار جرم تخلیه - زمان در چند بار شبیه‌سازی سیلوی با شرایط فوق‌بحرانی.

۴-۵- مطالعه‌ی اثر دامنه‌ی ارتعاش

دامنه‌ی ارتعاش یک عامل تعیین‌کننده در میزان عملکرد ویراتور در رفع انسداد سیلو است. درواقع دامنه‌ی ارتعاش بیانگر میزان تغییر فرم دیواره بوده که باعث جابه‌جاشدن ذرات مجاور خود می‌شود. شکل ۹ نمودارهای جرم خروجی - زمان به‌ازای سیلوی فوق‌بحرانی (مسدود) با اندازه‌ی دهانه‌ی ۳۲ mm را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که افزایش دامنه‌ی ارتعاش در فرکانس پایین، مانند ۵۰۰ Hz باعث افزایش محسوس شیب نمودار

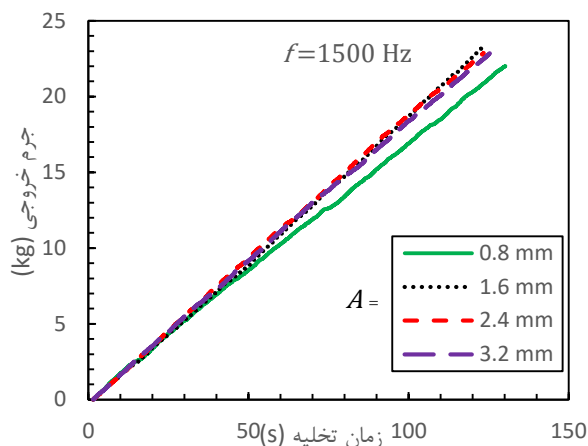
زمان حاصل از آزمایشات تجربی آن، ۳/۰۶٪ خطا را نشان می‌دهد، درحالی‌که بر اساس نتایج شبیه‌سازی تحقیق حاضر، این زمان ۳۰,۰۲ s به‌دست آمده که بیانگر اختلاف کم (حدوداً ۲,۵٪) نسبت به مقدار تجربی است.

جدول ۴- مقایسه‌ی نتایج شبیه‌سازی حاضر نسبت به نتایج شبیه‌سازی و تجربی.

نرخ تخلیه (kg/s)	زمان تخلیه (s)	درصد تفاوت نسبت به نتایج تجربی مرجع [۲۰]	
-	۲۹,۲۷	-	نتایج تجربی مرجع [۲۰]
۱,۷	۲۸,۳۶	۳,۰۶	نتایج شبیه‌سازی مرجع [۲۰]
۱,۶۴	۳۰,۰۲	۲,۵	نتایج تحقیق حاضر

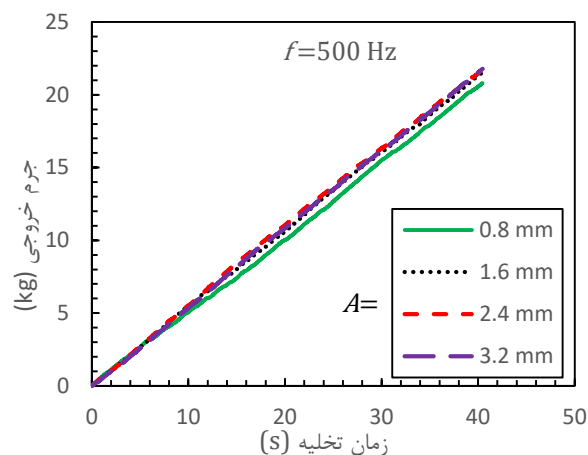
۴-۴- تأثیر اندازه‌ی دهانه و شناخت اندازه‌ی بحرانی

همان‌گونه که پیشتر نیز اشاره شد، بدیهی است که اندازه‌ی دهانه‌ی خروجی سیلو عامل تعیین‌کننده‌ی در تخلیه‌ی آن است. در اینجا به‌ازای اندازه‌های مختلف دهانه‌ی خروجی، شبیه‌سازی‌ها انجام گردید و همان‌گونه که در شکل ۸ نشان داده شده است، وقتی قطر دهانه‌ی خروجی سیلو کمتر از مقدار بحرانی است، جریان تخلیه منقطع است. درواقع در زمان‌هایی که به واسطه‌ی سقف قوسی و انسداد خروجی تخلیه متوقف شده، نمودار جرم - زمان به‌صورت خط افقی درآمده است. بر اساس این نمودارها، درنهایت نیز تخلیه‌ی کامل در زمان معمول حاصل نشده و شبیه‌سازی متوقف گردیده است. همچنین

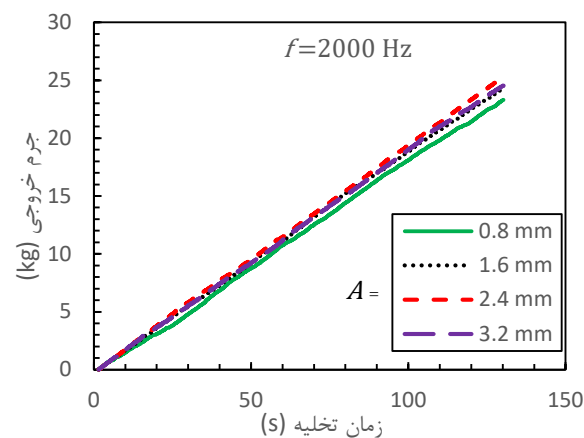
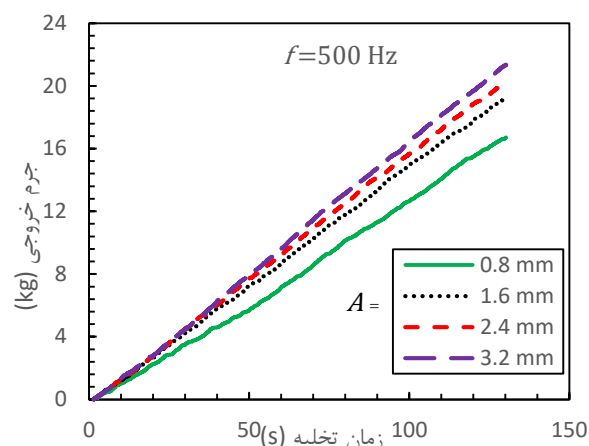
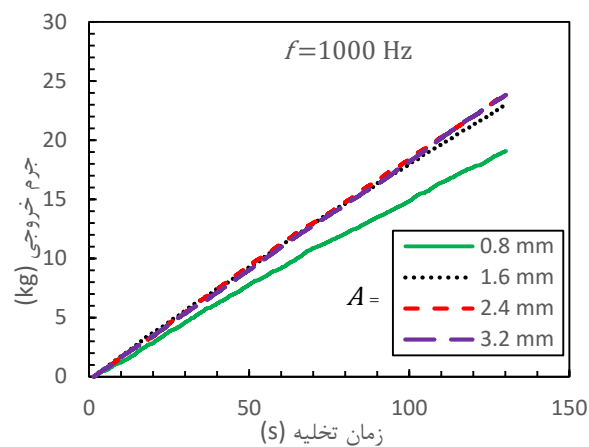


شکل ۹- نمودارهای تغییرات جرم خروجی بر حسب زمان تخلیه به ازای مقادیر مختلف دامنه و فرکانس برای سیلوی فوق بحرانی با دهانه ۳۲ mm (حالت فوق بحرانی).

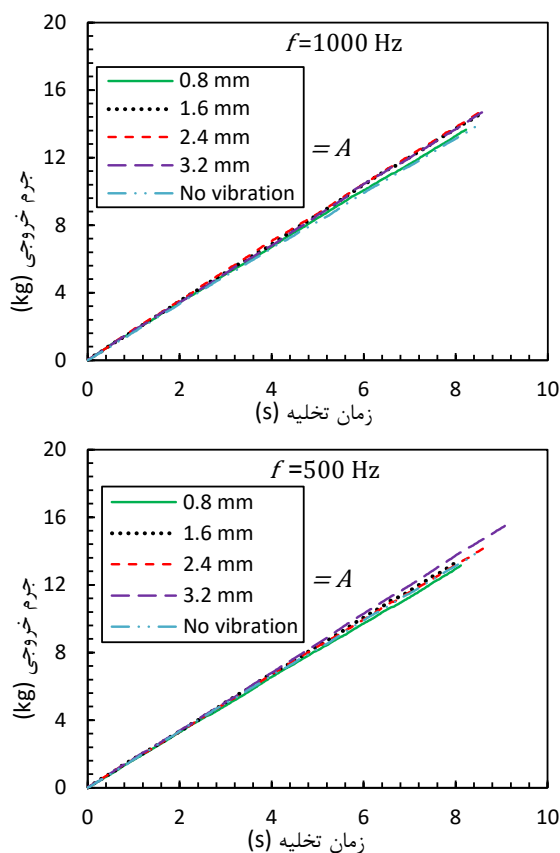
حال سؤال این است که اثر دامنه ارتعاش بر سیلویی با درجه‌ی بحرانی کمتر چگونه است؟ برای پاسخ به این سؤال، این مطالعه بر روی سیلوی آستانه‌ی بحرانی با اندازه‌ی دهانه‌ی خروجی ۴۲ mm انجام شد و نمودارهای مربوطه در شکل ۱۰ آمده است. مشاهده می‌شود که در فرکانس ۵۰۰ Hz با افزایش دامنه‌ی ارتعاش، نرخ تخلیه اندکی افزایش می‌یابد، ولی با افزایش فرکانس به ۱۰۰۰ Hz، تأثیر آن کاهش یافته و نمودارها تقریباً بر هم منطبق شده‌اند، ولی با افزایش بیشتر فرکانس و رسیدن به ۲۰۰۰ Hz، تأثیر دامنه‌ی ارتعاش معکوس شده، به نحوی که با افزایش آن نرخ تخلیه کاهش یافته است.



شده که مبین تقویت نرخ تخلیه است. دقت در نمودارها نشان می‌دهد که با افزایش فرکانس، اختلاف بین شیب آن‌ها کمتر شده است؛ بنابراین می‌توان نتیجه گرفت در شرایط دهانه‌ی فوق بحرانی، افزایش دامنه‌ی ارتعاش در فرکانس‌های پایین اثر بیشتری بر افزایش نرخ تخلیه دارد و به بیانی دیگر، با افزایش فرکانس از شدت اثر دامنه‌ی ارتعاش کاسته می‌شود.

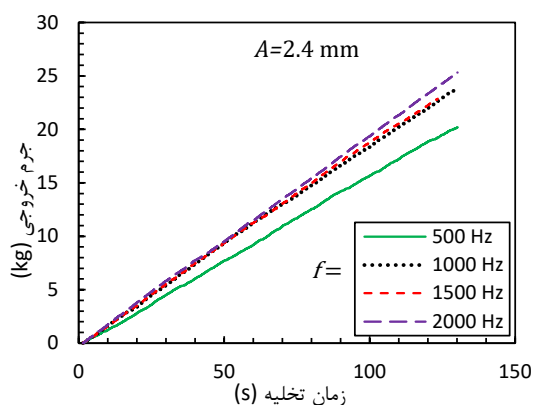
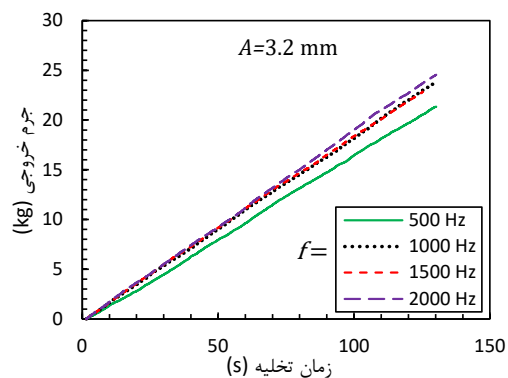
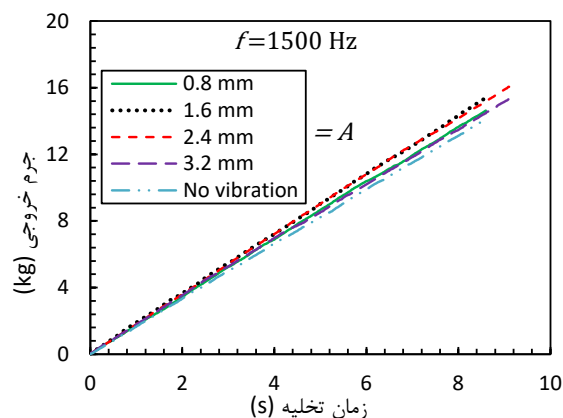
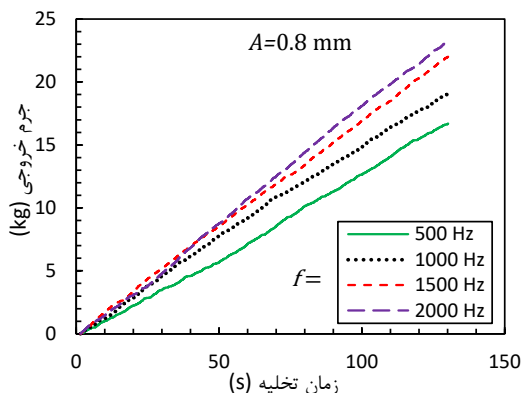
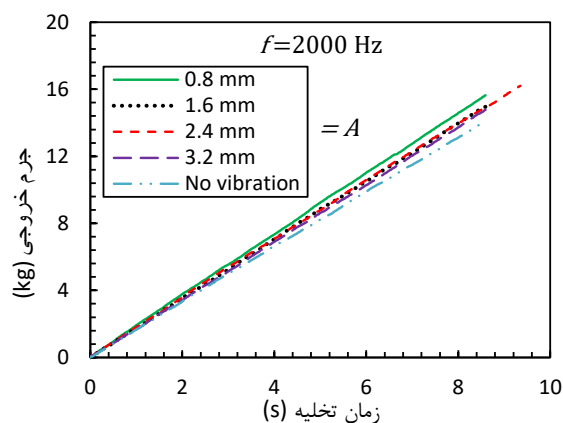
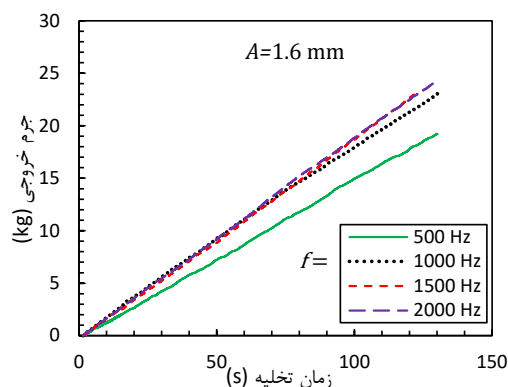


بر اساس نتایج این بخش، می‌توان گفت که افزایش دامنه‌ی ارتعاش در سیلوی فوق‌بحرانی منجر به تقویت اثر ویبراتور در تقویت نرخ تخلیه شده، ولی با افزایش فرکانس، نتایج مربوط به اعمال مقادیر مختلف دامنه‌ی ارتعاش به هم نزدیک شده است. از طرفی، با افزایش اندازه‌ی دهانه‌ی سیلو و رسیدن به حالت غیربحرانی، اساساً تفاوت قابل‌توجهی بین اثر اعمال مقادیر مختلف دامنه‌ی ارتعاش مشاهده نمی‌شود و حتی با افزایش دامنه، بعد از حد مشخصی تأثیر منفی بر نرخ تخلیه حادث شده است. از لحاظ تفسیر فیزیکی می‌توان گفت که با افزایش دامنه‌ی ارتعاش، جابه‌جایی بیشتری به ذرات مجاور دیواره وارد شده و شانس شکست سقف قوسی و همچنین رفع چسبندگی افزایش می‌یابد، ولی افزایش بیش‌ازحد دامنه‌ی ارتعاش می‌تواند ذرات را به سمت بالا حرکت داده و به‌نظر می‌رسد اثر مثبت آن در شکست ارتباط ذرات تضعیف شده و برآیند دو اثر مثبت و منفی منجر به ناچیز شدن اثر ارتعاشات شده است.



شکل ۱۰- نمودارهای تغییرات جرم خروجی برحسب زمان تخلیه به‌ازای مقادیر مختلف دامنه و فرکانس ارتعاش برای سیلو با شرایط آستانه‌ی بحرانی با دهانه‌ی ۴۲ mm (حالت آستانه‌ی بحرانی).

برای تکمیل این بخش از مطالعه، سیلوی غیربحرانی با اندازه‌ی دهانه‌ی ۵۷ mm نیز مورد بررسی عددی قرار گرفت و نمودارهای مربوطه در شکل ۱۱ ارائه شده است. بر این اساس، تأثیر دامنه‌ی ارتعاش در فرکانس‌های ۵۰۰ و ۱۰۰۰ هرتز خیلی ناچیز بوده، ولی با افزایش فرکانس، تأثیر دامنه نمایان شده، هرچند نوع اثر آن منفی بوده است، به نحوی که با افزایش دامنه‌ی ارتعاش نرخ تخلیه اندکی کاهش یافته است. باوجوداین باید تأکید نمود که در بیشتر موارد اختلاف بین گراف‌ها بسیار کم است؛ بدین معنی که در سیلوی غیربحرانی، دامنه‌ی ارتعاش تأثیر قابل‌توجهی بر نرخ تخلیه نداشته است.

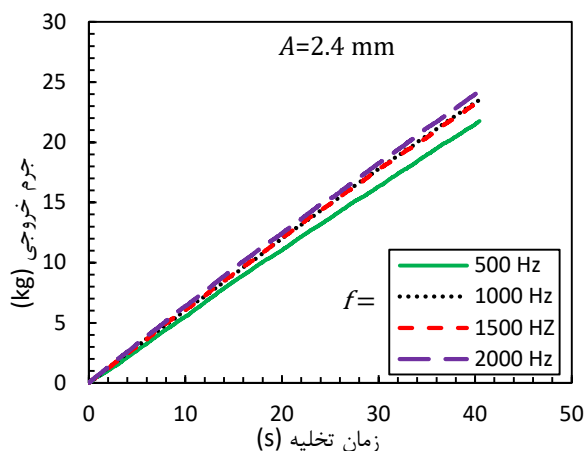


شکل ۱۱- نمودارهای تغییرات جرم خروجی برحسب زمان تخلیه به‌ازای مقادیر مختلف دامنه و فرکانس ارتعاش برای سیلو با دهانه‌ی ۵۷ mm (حالت غیربحرانی).

۴-۶- مطالعه‌ی اثر فرکانس ارتعاش

برای مطالعه‌ی مستقیم و واضح اثر فرکانس، نمودارهای مربوطه در شکل ۱۲ برای سیلوی فوق‌بحرانی با اندازه‌ی دهانه‌ی ۳۲ mm ارائه شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش فرکانس، نرخ تخلیه (شیب نمودار) افزایش یافته و با مقایسه‌ی چهار دسته‌ی نمودار می‌توان به این نتیجه رسید که با افزایش دامنه‌ی ارتعاش، دسته‌ی نمودارها به هم نزدیک‌تر شده‌اند؛ بنابراین هرچند با افزایش فرکانس تأثیر مثبت ویبراتور تقویت شده، ولی در همین حین باید به اثر دامنه نیز توجه نمود. درواقع مشاهده می‌شود که با افزایش دامنه‌ی ارتعاش، فاصله‌ی گراف‌های متعلق به انواع فرکانس کم شده؛ بدین معنی که اثر تغییر فرکانس تضعیف شده است.

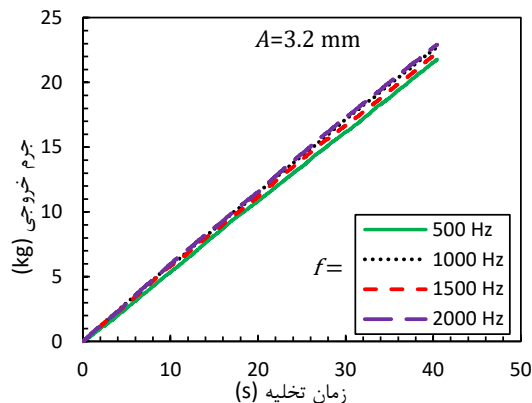
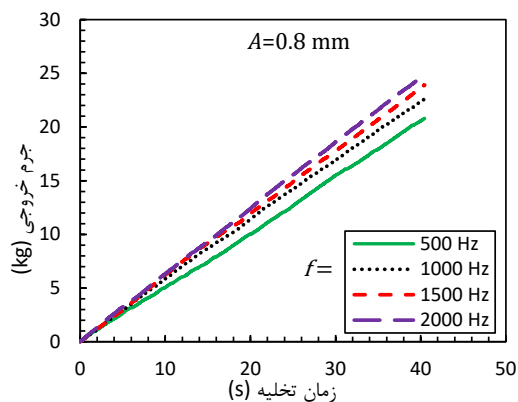
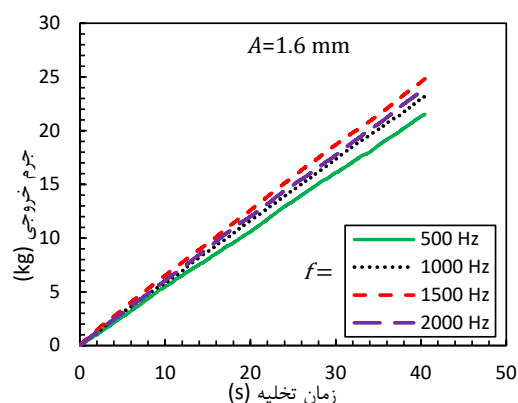
شکل ۱۲- نمودارهای تغییرات جرم خروجی برحسب زمان تخلیه به‌ازای مقادیر مختلف فرکانس و دامنه‌های ارتعاش برای سیلو با دهانه‌ی ۳۲ mm (حالت فوق‌بحرانی).

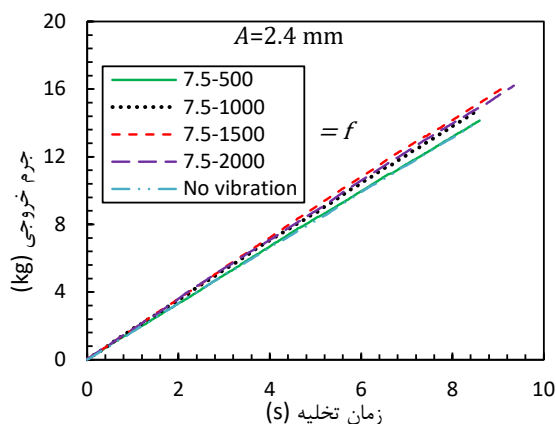


شکل ۱۳- نمودارهای تغییرات جرم خروجی برحسب زمان تخلیه به‌ازای مقادیر مختلف فرکانس و دامنه‌های ارتعاش برای سیلو با دهانه‌ی ۴۲ mm (حالت آستانه‌ی بحرانی).

برای تکمیل این بخش از مطالعه، نمودارهای لازم برای سیلوی غیربحرانی با دهانه‌ی ۵۷ mm در شکل ۱۴ ارائه شده است. ملاحظه می‌شود که در دامنه‌ی ۰٫۸ mm افزایش فرکانس باعث افزایش اندک نرخ تخلیه شده است، اما با مراجعه به دسته‌ی نمودارهای مربوط به دامنه‌های بالاتر، مشخص می‌شود که تغییر فرکانس ارتعاش تقریباً بی‌تأثیر بوده است. ویژگی یکسانی که در تمام این نمودارها مشاهده می‌شود این است که با وجود ویراتور، نرخ خروجی اندکی افزایش یافته است. از نظر تفسیر فیزیکی تأثیر فرکانس، به‌طور خلاصه می‌توان گفت که عموماً افزایش فرکانس در بازه‌ی مطالعه‌شده باعث تقویت نرخ تخلیه‌ی سیلوی فوق‌بحرانی شده و هرچه دامنه‌ی ارتعاش پایین‌تر بوده، این اثر مشهودتر است. با این حال، در سیلوی غیربحرانی تفاوت قابل توجهی بین اثر فرکانس‌های مختلف به چشم نمی‌خورد. در تفسیر فیزیکی این نتایج می‌توان به این واقعیت اشاره کرد که با افزایش فرکانس، انرژی موج تقویت گردیده و بر این اساس انرژی منتقل‌شده به ذرات مجاور دیواره‌ی سیلو نیز افزایش یافته است. این انرژی می‌تواند باعث

حال به‌ازای سیلویی با دهانه‌ی بزرگتر یعنی با دهانه‌ی آستانه‌ی بحرانی ۴۲ mm نتایج را بررسی می‌کنیم. در شکل ۱۳، نمودارهای مربوط به جرم خروجی برحسب زمان تخلیه به‌ازای مقادیر مختلف فرکانس در دامنه‌های ثابت ارائه شده است. در اینجا نیز می‌توان گفت که افزایش فرکانس در دامنه‌های ثابت باعث افزایش نرخ تخلیه گردیده است. با وجود این باید تأکید نمود که در این حالت نیز با افزایش دامنه‌ی ارتعاش، اختلاف بین نمودارهای متعلق به مقادیر مختلف فرکانس کم شده است.



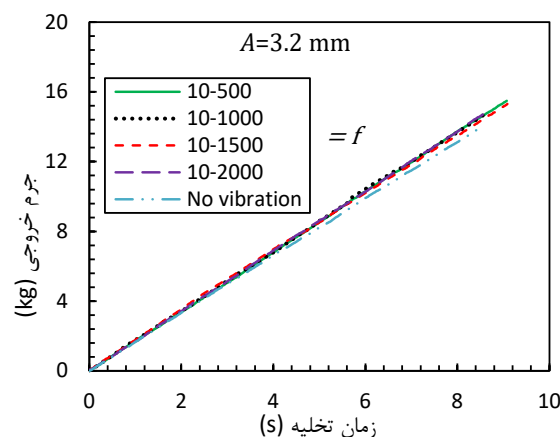
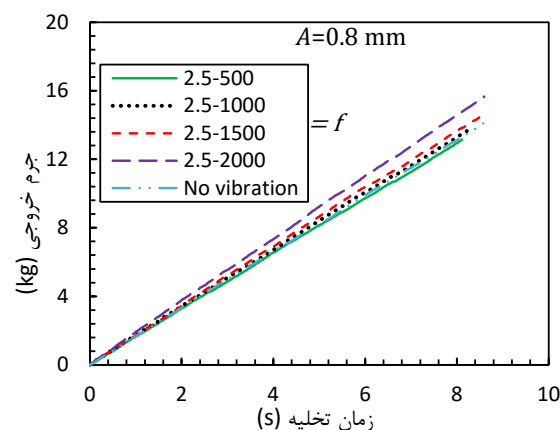
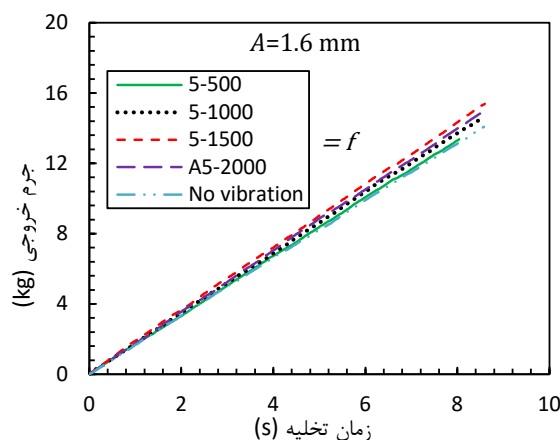


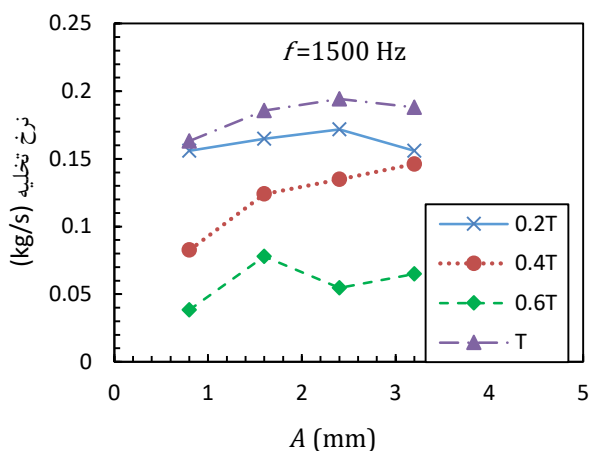
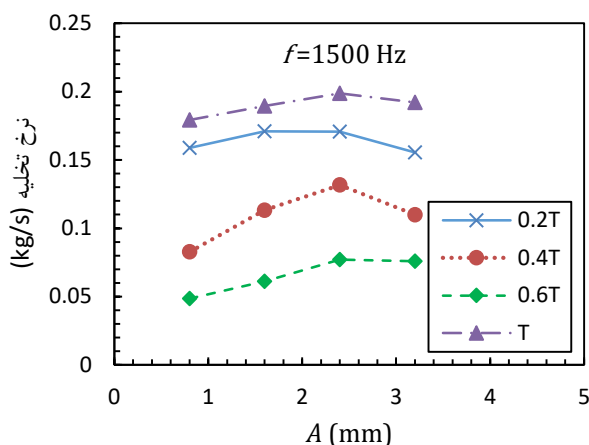
شکل ۱۴- نمودارهای تغییرات جرم خروجی بر حسب زمان تخلیه به‌ازای مقادیر مختلف فرکانس و دامنه‌های ارتعاش برای سیلو با دهانه‌ی mm ۵۷ (حالت غیربحرانی).

۴-۷- تأثیر محل ویبراتور

بدون تردید محل نصب ویبراتور نقش تعیین‌کننده‌ای در میزان اثرگذاری آن در رفع انسداد و رژیم تخلیه‌ی سیلو دارد. همان‌گونه که پیشتر در بخش مواد و روش کار توضیح داده شد، دیواره‌ی قیف تخلیه‌ی سیلو به چند ناحیه‌ی مجزا تقسیم شده و هر بار به یکی از این نواحی جابه‌جایی نوسانی اعمال شده است. البته در یک حالت نیز به کل دیواره‌ی جانبی ارتعاش اعمال شده است. در اینجا نتایج مطالعه‌ی اثر محل ویبراتور روی سیلو تحت بدترین شرایط یعنی حالت فوق‌بحرانی با اندازی دهانه‌ی ۳۲mm ارائه و در مورد آن بحث می‌شود. در نمودارهای شکل ۱۵، اثر محل ارتعاش به‌ازای چند فرکانس و دامنه‌ی مختلف بر روی نرخ تخلیه‌ی سیلوی فوق‌بحرانی نشان داده شده است. هر دسته‌ی نمودار بر حسب دامنه‌ی ارتعاش و به‌ازای مقادیر مختلف فرکانس تهیه شده است. درواقع، هر گراف از هر دسته‌ی نمودار به نتایج مربوط به نصب ویبراتور در یک محل مشخص تعلق دارد که در شکل ۵ و جدول ۳ معرفی شده اند. ملاحظه می‌شود که در بیشتر موارد، ارتعاش کل دیواره‌ی سیلو منجر به بیشترین تأثیر مثبت

غلبه بر چسبندگی ذرات شده و انسداد را برطرف نماید و جریان تقویت شود. باین حال باید اذعان نمود در شرایطی که سیلو غیربحرانی است، سهم انرژی ارتعاش نسبت به انرژی جنبشی جریان کلی ذرات قابل توجه نیست، پس تأثیر چندانی بر نرخ تخلیه نمی‌گذارد.



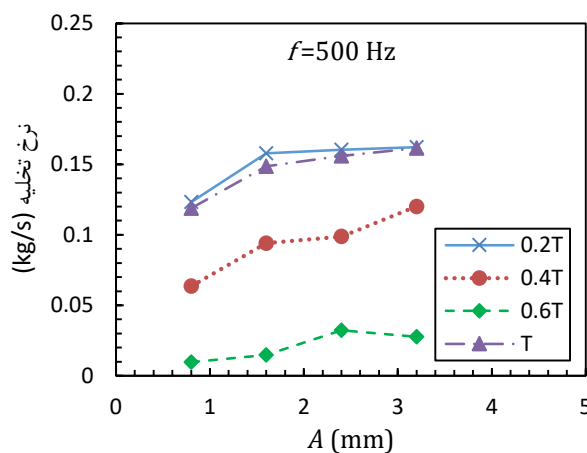
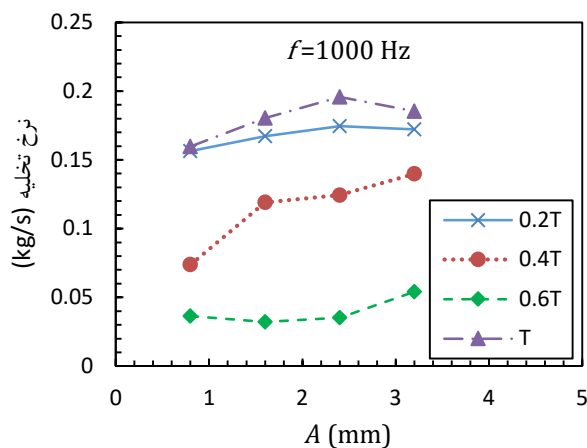


شکل ۱۵- نمودارهای تغییرات نرخ تخلیه برحسب دایره در فرکانس‌های مختلف برای ویبراتور در ارتفاع‌های $0.2T$ ، $0.4T$ و $0.6T$ و همچنین یک وجه کامل قیف برای سیلو با دهانه‌ی 32 mm حالت فوق بحرانی).

۵- نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

در این تحقیق، اثر اعمال ارتعاش دیواره‌ی قیف خروجی سیلو بر روی تخلیه‌ی آن با روش عددی المان گسسته مورد مطالعه قرار گرفت. جهت اطمینان از دقت شبیه‌سازی‌ها، آنالیز حساسیت به گام زمانی صورت پذیرفت. همچنین ارتفاع بار به اندازه‌ی کافی بزرگ انتخاب شد تا شرایط پایدار در جریان تخلیه‌ی سیلو برقرار باشد. برای اعتبارسنجی روش کار، مقایسه با نتایج عددی و تجربی گزارش شده در مراجع مرتبط انجام شد. سیلویی که تحت وزن مواد درونی و بدون تحریک ارتعاشی تخلیه شود غیر بحرانی نامیده شد

شده است، ولی اجرای این نوع ارتعاش در دنیای واقعی چندان عملیاتی نیست. با مقایسه‌ی دیگر حالات مشاهده می‌شود که هرچه مکان ویبراتور به دهانه‌ی خروجی نزدیک‌تر بوده، تأثیر مثبت بیشتری بر نرخ تخلیه داشته است. این نوع نصب در شرایط واقعی قابل‌پیاده‌سازی است، هرچند باید محدودیت‌های فیزیکی احتمالی مدنظر قرار گیرد. در مورد چرایی فیزیکی چنین رفتاری می‌توان گفت که وقتی در نزدیکی خروجی ارتعاش وارد می‌شود، انرژی آن به‌صورت مؤثر در محل قفل‌شدگی ذرات وارد شده و آن ناحیه آزاد می‌شود و به دنبال آن، توده‌ی بزرگ‌تر ذرات از بالا امکان حرکت و تشدید جریان را خواهد داشت. از طرف مقابل، وقتی ارتعاش در نواحی بالاتر وارد می‌شود، چون دهانه مسدود است، با قدرت کمتری می‌تواند به جریان خروجی کمک نماید.



۶-مراجع

- [1]. Janssen, H.A., Versuche über Getreidedruck in Silozellen. Zeitschrift des Vereines Deutscher Ingenieure, 1895. 39: p. 1045-1049.
 - [2]. Beverloo, W.A., H.A. Leniger, and J. van de Velde, The flow of granular solids through orifices. Chemical Engineering Science, 1961. 15(3-4): p. 260-269.
 - [3]. Walker, D.M., An approximate theory for pressures and arching in hoppers. Chemical Engineering Science, 1966. 21(11): p. 975-997.
 - [4]. Walters, J.K., A theoretical analysis of stresses in silos with vertical walls. Chemical Engineering Science, 1973. 28(1): p. 13-21.
 - [5]. Arnold, P.C. and A.S. Kaaden, Reducing hopper wall friction by mechanical vibration. Powder Technology, 1977. 16(1): p. 63-66.
 - [6]. Jarrett, N.D., A study of the influence of wall flexibility on pressure in rectangular silos, in School of Engineering and Design. 1991, Brunel University.
 - [7]. To, K., P.-Y. Lai, and H.K. Pak, Jamming of Granular Flow in a Two-Dimensional Hopper. Physical Review Letters, 2001. 86(1): p. 71-74.
 - [8]. Zuriguel, I., et al., Jamming during the discharge of grains from a silo described as a percolating transition. Physical Review E, 2003. 68(3): p. 030301.
 - [9]. Uñac, R.O., et al., Experimental study of discharge rate fluctuations in a silo with different hopper geometries. Powder Technology, 2012. 225: p. 214-220.
 - [10]. Mellmann, J., T. Hoffmann, and C. Füll, Mass flow during unloading of agricultural bulk materials from silos depending on particle form, flow properties and geometry of the discharge opening. Powder Technology, 2014. 253: p. 46-52.
- و با کاهش اندازه‌ی دهانه به آستانه‌ی انسداد رسید که به نام بحرانی نام‌گذاری گردید. وقتی اندازه‌ی دهانه از این حد کوچکتر باشد، انسداد قطعی رخ داده و حالت فوق‌بحرانی نامیده شد. مطالعات عددی بر روی سه حالت فوق‌بحرانی، بحرانی و غیربحرانی انجام و مشخص شد که ارتعاشات تأثیر قابل توجهی در رفع انسداد و افزایش نرخ تخلیه‌ی سیلوهای بحرانی و فوق‌بحرانی دارد. هرچند میزان اثرگذاری آن در سیلوی غیربحرانی کمتر است. بر اساس نتایج عددی، افزایش دامنه‌ی ارتعاش تا رسیدن به یک مقدار بهینه منجر به افزایش دبی تخلیه شده، ولی پس از آن روال کاهشی می‌گیرد. همچنین مشخص شد که با افزایش فرکانس ارتعاش، نرخ تخلیه‌ی سیلوی فوق‌بحرانی تقویت می‌شود، هرچند اثر افزایشی آن یک‌نواخت نیست، بلکه به تدریج تضعیف می‌شود. به علاوه مشخص شد که محل ویبراتور هرچه به دهانه‌ی خروجی نزدیکتر باشد، میزان اثر مثبت آن بر نرخ تخلیه افزایش می‌یابد. طی متن در مورد چرایی فیزیکی اثر متغیرهای ارتعاشی بر جریان تخلیه‌ی سیلو بحث شد و به خصوص به تأثیر انرژی ناشی از ارتعاشات در شکستن پیوند و چسبندگی بین ذرات اشاره گردید. با این اوصاف، پیشنهاد می‌شود که در غیاب ویبراتور، رفتار جریان خروجی سیلو مشاهده شده و انسداد احتمالی آن بررسی گردد. بدین ترتیب اگر سیلو اساساً دچار انسداد نیست، نمی‌توان با نصب ویبراتور انتظار تقویت قابل توجه نرخ تخلیه‌ی آن را داشت. در مقابل، در صورت وجود انسداد حتی به صورت موقتی، نصب ویبراتور در نزدیک‌ترین محل ممکن به خروجی سیلو توصیه می‌گردد. به علاوه مشخص شد که یک تنظیم قطعی برای فرکانس و دامنه‌ی (نیروی تحریک) ارتعاش وجود ندارد، بلکه باید مقدار بهینه‌ی آن تعیین و در آن شرایط کاری تنظیم گردد. درواقع، اگر ویبراتور در شرایط بهینه تنظیم نباشد، اثر مثبت قابل انتظار در رفع گرفتگی و تقویت جریان خروجی را نخواهد داشت.

- [21]. Kobyłka, R. and M. Molenda, DEM simulations of loads on obstruction attached to the wall of a model grain silo and of flow disturbance around the obstruction. *Powder Technology*, 2014. 256(0): p. 210-216.
- [22]. Jafari, A. and V. Saljooghi Nezhad, Employing DEM to study the impact of different parameters on the screening efficiency and mesh wear. *Powder Technology*, 2016. 297: p. 126-143.
- [23]. Johnson, K.L. and K.L. Johnson, *Contact mechanics*. 1987: Cambridge university press.
- [24]. Brilliantov, N.V., et al., Model for collisions in granular gases. *Physical Review E*, 1996. 53(5): p. 5382-5392.
- [25]. Yan-hua, C. and T. Xin, Application of the DEM to screening process: a 3D simulation. *Mining Science and Technology*, 2009. 19: p. 0493-0497.
- [26]. Guifeng, W. and T. Xin, Screening efficiency and screen length of a linear vibrating screen using DEM 3D simulation. *Mining Science and Technology (China)*, 2011. 21: p. 451-455.
- [27]. Gear, C.W., *Numerical initial value problems in ordinary differential equations* 1971: Prentice-Hall, Englewood Cliffs.
- [28]. Christoph Kloss, et al., Models, algorithms and validation for opensource DEM and CFD-DEM. *Progress in Computational Fluid Dynamics, An Int. J.*, 2012. 12(2/3): p. 140-152.
- [29]. Nedderman, R.M., et al., The flow of granular materials—I: Discharge rates from hoppers. *Chemical Engineering Science*, 1982. 37(11): p. 1597-1609.
- [11]. Wilson, T.J., et al., Reply to the commentary on granular discharge rate for submerged hoppers. 2014. Vol. 6. 2014.
- [12]. Huang, W., et al., Discharge characteristics of cohesive fine coal from aerated hopper. *Powder Technology*, 2009. 194(1-2): p. 126-131.
- [13]. Lu, H., et al., Study on the fluidization and discharge characteristics of cohesive coals from an aerated hopper. *Powder Technology*, 2011. 207(1-3): p. 199-207.
- [14]. Jafari, A. and R. Abbasi Hattani, Investigation of parameters influencing erosive wear using DEM. *Friction*, 2019.
- [15]. Jafari, A., M. Javaheri, and G. Baradaran, Computer simulation to optimize roller screen settings providing higher efficiency in green pellets classification. *Computers & Chemical Engineering*, 2022. 161: p. 107767.
- [16]. Goda, T.J. and F. Ebert, Three-dimensional discrete element simulations in hoppers and silos. *Powder Technology*, 2005. 158(1-3): p. 58-68.
- [17]. Langston, P., et al., Vibration induced flow in hoppers: continuum and DEM model approaches. *Granular Matter*, 2009. 11(2): p. 99-113.
- [18]. Fraige, F.Y., et al., Vibration induced flow in hoppers: DEM 2D polygon model. *Particuology*, 2008. 6(6): p. 455-466.
- [19]. Matchett, A.J., A Theoretical Model of Vibrationally Induced Flow in Conical Hopper Systems. *Chemical Engineering Research and Design*, 2004. 82(1): p. 85-98.
- [20]. González-Montellano, C., et al., Validation and experimental calibration of 3D discrete element models for the simulation of the discharge flow in silos. *Chemical Engineering Science*, 2011. 66(21): p. 5116-5126.

مدل سازی و بررسی رفتار DNA اوریگامی مثلثی تحت تأثیر دمای آزمایشگاهی

صادق دستورانی^{۱*}، رضا حسنزاده قاسمی^۲

۱- دانشجوی دکتری؛ فنی و مهندسی، مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

۲- دانشیار؛ فنی و مهندسی، مهندسی مکانیک، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران.

چکیده

در این مقاله، رفتار مکانیکی DNA اوریگامی مثلثی که دارای مشخصات ظاهری و عملکرد ویژه‌ای می‌باشد، مورد بررسی قرار گرفته است. DNA اوریگامی مثلثی را می‌توان به عنوان یک نانوسپیله‌ی دارای چند درجه‌ی آزادی معرفی کرد. برای بررسی این موضوع، مدل سازی و شبیه سازی دینامیک مولکولی انجام شده است و سپس به تحلیل عملکرد آن پرداخته می‌شود. اولین گام در شناخت یک نانوسپیله تحلیل ساختاری آن می‌باشد. در این گزارش، تغییرات ساختاری نانوسپیله در اثر تغییر دما مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد میزان تغییرات ساختاری تقریباً در ۸۰۰ پیکوثانیه به کمترین میزان خود رسیده است. پس از طی این بازه‌ی زمانی می‌توان گفت DNA اوریگامی مثلثی نسبتاً به ثبات ساختاری رسیده است. رفتار مکانیکی DNA اوریگامی به صورتی خواهد بود که آن را برای گرفتن حجم متفاوتی از محموله‌ها مناسب می‌کند. به عبارتی، از آن می‌توان برای حمل نانوداروهایی با ابعاد متنوع استفاده کرد. درواقع، پارامتری که در این نانوسپیله بسیار جالب توجه است، انعطاف پذیری بازوهای آن است. این انعطاف پذیری می‌تواند به طور شایسته‌ای برای حمل انواع مختلفی از محموله‌ها مورد استفاده قرار گیرد.

کلمات کلیدی

رفتار مکانیکی، شبیه سازی دینامیک مولکولی، DNA اوریگامی.

Modeling and investigating the behavior of triangular origami DNA under the influence of laboratory temperature

Sadegh Daştorani^{1*}, Reza Hasanzadeh Ghasemi²

1- PhD candidate, Department of Mechanical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Iran.

2- Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, Hakim Sabzevari University, Iran.

Abstract

In this article, the mechanical behavior of triangular origami DNA, which has special appearance and functional characteristics, has been investigated. Triangular origami DNA can be introduced as a Nano-device with several degrees of freedom. To investigate this issue, molecular dynamics modeling and simulation have been done and then its performance is analyzed. The first step in knowing a Nano-device is its structural analysis. In this report, the structural changes of the Nano-device due to the change in temperature have been investigated the results show that the amount of structural changes has reached its lowest level in approximately 800 picoseconds. After this period of time, it can be said that the triangular origami DNA has relatively reached structural stability. The mechanical behavior of origami DNA will be such that it is suitable for taking different volumes of cargo. In other words, it can be used to carry Nano drugs with various dimensions. In fact, the most interesting parameter in this Nano-device is the flexibility of its arms. This flexibility can be properly used to carry different types of cargo.

Keywords

Mechanical behavior, Molecular dynamics simulation, Origami DNA

۱- مقدمه

هدف اصلی در زمینه‌ی ماشین‌های مولکولی استفاده از المان‌های بیولوژی مختلف به عنوان اجزای ماشین است که وظیفه‌ی آن‌ها ایجاد حرکت، نیرو یا سیگنال می‌باشد. این اجزا وظایف بیولوژی از قبل برنامه‌ریزی شده را در پاسخ به فعالیت‌های فیزیوشیمیایی خاص، اما به صورت مصنوعی انجام می‌دهد. در این زمینه، پروتئین^۱ و DNA^۲ می‌توانند به صورت موتور، اتصال مکانیکی، المان‌های انتقال یا سنسور عمل کنند. اگر همه‌ی این اجزای مختلف در تناسب و چرخش صحیح باهم مونتاژ شوند، می‌توانند نانوسایلی با چند درجه‌ی آزادی تشکیل دهند که قادر به اعمال نیروها و دستکاری اشیاء در جهان نانو باشند. مزیت استفاده از اجزای ماشینی طبیعی، کارایی و قابل اطمینان بودن آن‌هاست.

طبیعت از DNA به عنوان حامل اطلاعات استفاده می‌کند. خصوصیات خاصی که در DNA وجود دارد، سبب شده این المان انتخاب جذابی برای ساخت اجزای نانومکانیک مصنوعی باشد. در سال‌های اخیر، از DNA در سیستم‌های مکانیکی - شیمیایی و نیز سیستم‌های نانوالکترونیک استفاده شده است [۳].

تعدادی از آنزیم‌ها، مانند کاینزین^۳ [۴]، RNA پلیمراز^۴ [۵]، میوزین^۵ [۶]، داینین^۶ [۷]، به صورت موتورهای بیولوژیکی خطی، چرخشی یا نوسانی در مقیاس نانو عمل می‌کنند. دیگر موتورهایی که به طور گسترده‌ای مورد بررسی قرار گرفته‌اند شامل موتورهای فلاژلا^۷

محصولات مهندسی مولکولی برای انجام فعالیت نیاز به دستگاه‌های رباتیکی دارند که با عنوان نانورباتیک شناخته می‌شود. یک نانوربات اساساً یک ماشین قابل کنترل در مقیاس نانومتر یا مولکولی است که از اجزایی در مقیاس نانو تشکیل شده است. حوزه‌ی نانورباتیک به مطالعه در طراحی، ساخت، برنامه‌ریزی و کنترل ربات‌های در مقیاس نانو می‌پردازد [۱].

نانوربات‌ها می‌توانند هر ساختار فعال یا غیرفعال قادر به تحریک، حس کردن، فرستادن سیگنال، تحلیل اطلاعات، هوش مصنوعی و رفتار گروهی در مقیاس نانو را تشکیل دهند [۲].

توانایی دستکاری کردن در مقیاس نانو کاربرد اصلی نانوربات‌ها می‌باشند. کاربردها از پزشکی تا هوافضا و کاربردهای نظامی تغییر می‌کند. ساخت وسایل پیچیده‌ی مولکولی می‌تواند به وسیله‌ی نانوربات‌ها در آینده ممکن شود. انتظار می‌رود در آینده، نانوربات‌ها در صنعت پزشکی از دارورسانی دقیق تا تعمیر سلول‌ها و از بین بردن سلول‌های سرطانی انقلاب اساسی ایجاد کنند. این کاربردها تحت زمینه نانو دارو بیان می‌شود، که زمینه بسیار فعال تحقیقاتی در نانوتکنولوژی است؛ بنابراین ماشین‌های مولکولی از اجزای اساسی در کاربردهای آینده در مقیاس نانو می‌باشد.

۱- Protein

۲- Deoxyribonucleic Acid

۳- kinesin

۴- RNA polymerase

۵- Myosin

۶- dynein

۷- flagella

[۸] و روتاکسان^۱ [۹] بوده که مثال‌هایی از موتورهای شیمیایی خالص هستند. علاوه بر این موارد، اجزایی مانند پروتئین‌های شبه‌فتر با نام فیبرنکتین^۲ [۱۰] و ورتیسلیز^۳ [۱۱] و نیز پلیمرهای قابل انقباض مصنوعی را نیز می‌توان نام برد.

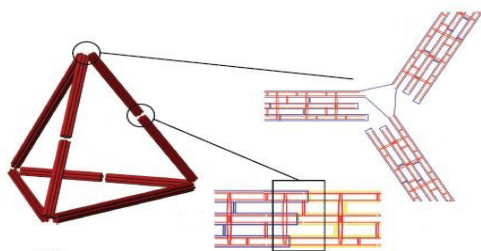
علاوه بر ماشین‌های بر اساس پروتئین، چندین محقق در حال تحقیق برای استفاده از DNA در مکانیزم‌های در مقیاس نانو هستند. در مقایسه با ساختارهای پروتئینی، DNA کوچک، ساده و همگن بوده و ساختار و وظایفش به‌خوبی مورد بررسی قرار گرفته است [۱۲].

یکی از شاخه‌های جذاب در زمینه DNA، ساختارهای DNA اورینگامی است. تنها یک دهه است که از شروع فعالیت در این زمینه می‌گذرد. ساختار DNA اورینگامی طراحی شده، چه در حالت دوبعدی، و چه در حالت سه‌بعدی دارای داربست اصلی به‌صورت تک‌رشته‌ای بلند و چندین زنجیره‌ی فرعی به‌صورت تک‌رشته‌ای کوتاه می‌باشد که به کمک این رشته‌ها به هم آمیخته شدند (تا خورده‌اند). مطالعه‌ی DNA اورینگامی هم‌اکنون وارد فاز دوم عملی شده است. یکی از راه‌های جذب برای محققین توسعه‌ی دستگاه‌های نانومکانیک در حوزه‌ی DNA اورینگامی می‌باشد.

قابلیت سوار کردن چندین رشته‌ی DNA از فواید تکنیک DNA اورینگامی است که برای ساختن دستگاه‌های مولکولی مصنوعی استفاده می‌شوند. کاربردهای میان‌رشته‌ای ساختمان DNA اورینگامی نه‌تنها در نانومهندسی، بلکه در شیمی وابسته به نانو و زمینه‌ی پزشکی در حال رشد می‌باشد [۱۳].

ایده‌ی استفاده از DNA به عنوان ماده‌ی ساخت اولین بار در سال ۱۹۸۲ توسط نادرین سیمن^۴ معرفی شد. در تاریخ مطالعات DNA اورینگامی، سال ۲۰۰۹ سال مهمی بوده است که نشان از اختراع انواع ساختارهای DNA اورینگامی سه‌بعدی دارد. چهار ساختار مستقل توخالی DNA اورینگامی سه‌بعدی متشکل از صفحه‌های مسطح (دو جعبه، یکی چهارضلعی و منشور) گزارش شده است و با معرفی قابل توجه چندلایه و طراحی DNA اورینگامی لانه‌زنبوری همراه می‌شود. در میان چهار ساختار DNA اورینگامی سه‌بعدی، دو جعبه‌ی DNA اورینگامی برای دستیابی به مکانیزم باز و بسته‌شدن طراحی شده‌اند [۱۴].

در سال ۲۰۱۱، اسمیت^۵ و همکاران یک چهاروجهی انعطاف‌پذیر به کمک DNA اورینگامی طراحی کردند که در این چهاروجهی، اضلاع آن به کمک نانولوله طراحی شده و این اضلاع توسط رشته‌های DNA به همدیگر مفصل شدند. همچنین سه ضلع از اضلاع آن برای انعطاف‌پذیری ساختار چهاروجهی به کمک رشته‌های DNA متصل شدند (شکل ۱) [۱۵].



شکل ۱: چهاروجهی انعطاف‌پذیر با DNA اورینگامی [۱۵]

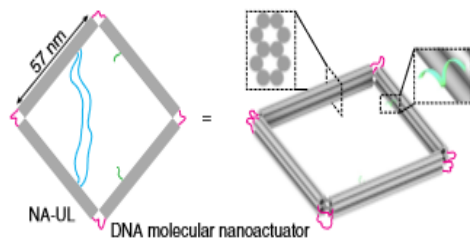
۱- Rotaxanes

۲- Fibronectin

۳- vorticellids

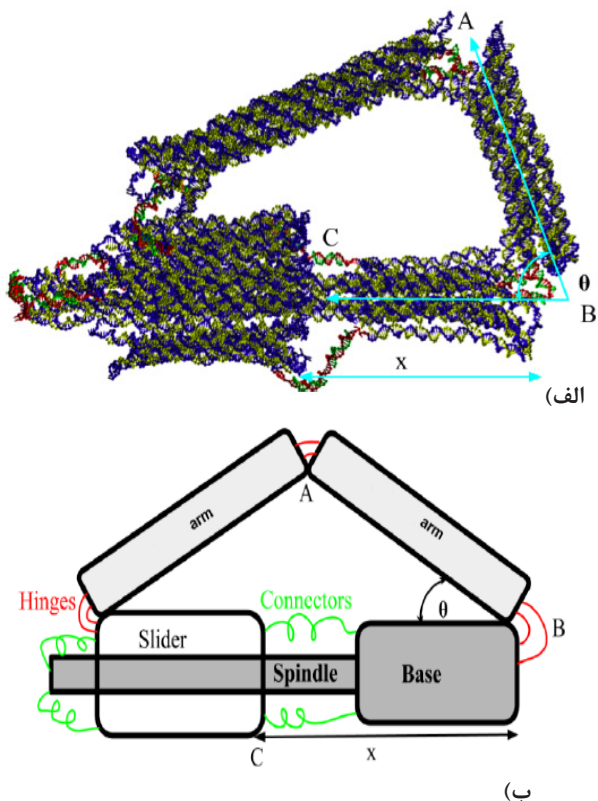
۴- Nadrian Seeman

۵- Smith



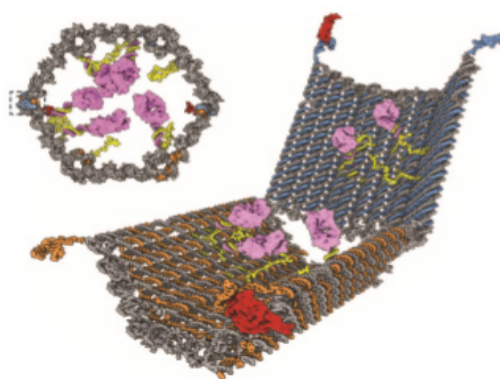
شکل ۳- نانوسیله‌ی سه‌بعدی [۱۷]

شرما^۳ و همکاران در سال ۲۰۱۷ یک نانوساختار مکانیکی بر اساس DNA اوریگامی ارائه داده‌اند و چگونگی حرکت آن را بررسی نموده‌اند. این نانوساختار دارای مفصل‌های کشویی و دورانی می‌باشد. همان‌طور که در شکل ۴ نشان داده شده است، این نانوساختار دارای یک نوار کشویی، یک پایه و اسپیندل^۴ و دو بازو است که طراحی‌ها با DNA اوریگامی انجام گرفته است. [۱۸].



شکل ۴: یک مکانیزم میل لنگ و کشویی با DNA [۱۸]، الف) نمای

در سال ۲۰۱۲، داگلاس^۱ و همکاران نانوربات DNA را ارائه دادند که یک دستگاه DNA اوریگامی نانومکانیکی است که قادر به حمل بارهای مولکولی به سلول‌ها، شناسایی ورودی‌های سطح سلولی برای فعال‌سازی، فعال‌سازی و بازنگری ساختار آن برای تحویل بارگیری است. نانوربات DNA به شکل یک بشکه‌ی شش ضلعی با ابعاد ۳۵ نانومتر × ۳۵ نانومتر × ۴۵ نانومتر می‌باشد (شکل ۲) [۱۶].



شکل ۲: نانوربات DNA اوریگامی [۱۶]

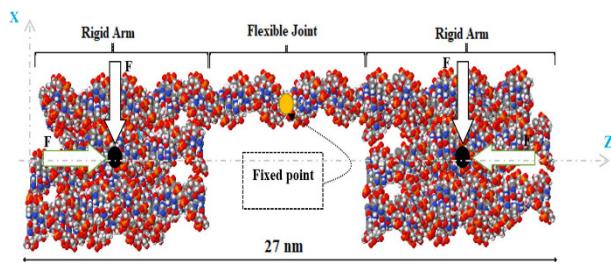
در سال ۲۰۱۶، که^۲ و همکاران یک نانوسیله‌ی سه‌بعدی لوزی‌شکل با قابلیت تنظیم فاصله‌ی بین آن‌ها طراحی کردند. این وسیله از چهار بازو تشکیل شده که رشته‌های صورتی آن‌ها را به هم مفصل کرده و دارای دو رشته‌ی جذب (سبز) برای پیوستن مولکول محموله است و دارای دو بخش رشته‌ای (آبی) که دو بازوی چپ را به هم متصل می‌کند (شکل ۳) [۱۷].

۱- Douglas

۲- Ke

۳- Sharma

۴- Spindel



شکل ۵: نانومفصل DNA اوریگامی [۲۳]

DNA مکانیزم، ب) نمای شماتیک مکانیزم

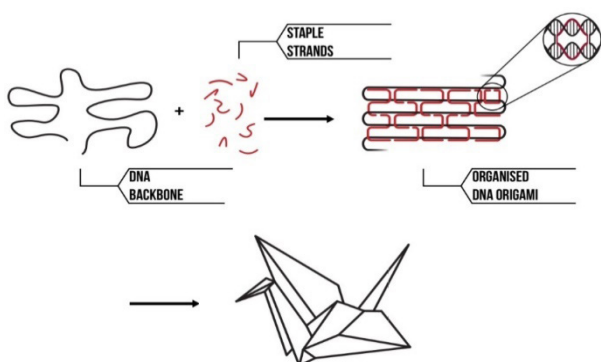
در سال ۲۰۱۷، لی^۱ و همکاران یک طراحی منطقی با نرم‌افزار کدننو^۲ برای ایجاد اشکال خمیده‌ی مجزا با هندسه‌های قابل کنترل و انعطاف‌پذیری به کمک DNA اوریگامی ارائه دادند که این اشکال دارای ساختار مفصلی و برای حمل نانومحموله می‌باشند. [۱۹]. در سال ۲۰۲۰، خسروی و همکاران یک صفحه‌ی نازک DNA

وریگامی طراحی و با استفاده از شبیه‌سازی دینامیک مولکولی مورد بررسی قرار داده‌اند. مدل در محدوده‌ی دمایی وسیع شبیه‌سازی شده و پایداری آن بررسی شده است. نتایج نشان داد که نانوحفره‌ی طراحی‌شده پایداری مناسبی را در این دماها از خود نشان می‌دهد و با وجود برخی اعوجاج‌ها در ساختار، در دماهای بالا هیچ شکستی مشاهده نشد. در آخر نشان دادند از نانوحفره‌ی پیشنهادی می‌توان برای عبور طیف وسیعی از مولکول‌ها، درشت‌مولکول‌ها و محموله‌های دارویی استفاده کرد [۲۰]. در سال ۲۰۲۱، مقیسه و همکاران نانوحامل را ابتدا طراحی و سپس با شبیه‌سازی دینامیک مولکولی پایداری آن را در دماهای نزدیک به بدن مورد بررسی قرار دادند [۲۱]. در سال ۲۰۲۱، دستورانی و همکاران یک نانومفصل DNA اوریگامی طراحی کردند (شکل ۵). سپس پایداری آن در سه دمای مختلف و همچنین خواص مکانیکی مانند سفتی خمشی، خیز و گشتاور آن را با شبیه‌سازی دینامیک مولکولی مورد بررسی قرار دادند [۲۲ و ۲۳].

۲- تئوری مسئله

۲-۱- تئوری DNA اوریگامی

نوع جدیدی از فناوری نانو به نام داربست^۳ DNA اوریگامی ارائه شده است که از DNA به عنوان ماده‌ای برای ایجاد نانوساختارهای مختلف از طریق طراحی توالی نوکلئوتیدی^۴ استفاده می‌کند [۲۴ و ۲۵]. تعریف اوریگامی در ژاپن به تا کردن کاغذ اشاره دارد. DNA اوریگامی^۵ یعنی تا کردن DNA برای ایجاد اشکال دوبعدی و سه‌بعدی دلخواه در مقیاس نانو (شکل ۶).



شکل ۶: ساختار DNA اوریگامی [۲۶]

۱- Lee

۲- caDNAo

۳- Scaffold

۴- Nucleotide Sequence

۵- DNA Origami

به‌طور خلاصه، MD روشی برای ادغام معادلات حرکت کلاسیک (نیوتنی) برای مجموعه‌ای از ذرات است [۳۸]. در نتیجه، مسیر یک سیستم در یک بازه‌ی زمانی معین، معمولاً ده‌ها تا صدها نانو ثانیه است. سپس می‌توان خواص ساختاری و دینامیکی مختلف سیستم را از مسیر محاسبه کرد که می‌توان آن‌ها را مستقیماً با نتایج تجربی مقایسه کرد. نتایج به‌دست‌آمده در این حوزه از دقت بالایی برخوردار هستند [۳۹].

با استفاده از شبیه‌سازی دینامیک مولکولی، تغییرات دما روی سیستم‌های بیولوژیکی قابل‌اعمال است. پاسخ سیستم بیولوژیکی، مانند تغییرات پیکربندی و پایداری ساختاری تحت شرایط دماهای مختلف به‌صورت کمی و کیفی بررسی می‌شود. دینامیک سیستم از طریق توابع انرژی پتانسیل به‌دست می‌آید که شامل برهمکنش‌های پیوندی و غیرپیوندی می‌باشند. توابع انرژی پتانسیل و خواص اتمی، هردو باهم تشکیل یک میدان نیرو^۱ را می‌دهند. میدان نیروی اتمی تمام اتم‌های موجود در سیستم را به‌طور دقیق بازگو می‌کند. الگوریتم کلی دینامیک مولکولی به این گونه است که برای شروع، به یک شرایط اولیه از موقعیت و سرعت اتم‌ها و همچنین تابع پتانسیل مربوط به برهمکنش بین اتم‌ها نیاز است. در مرحله‌ی دوم نیروی اعمالی بر هر اتم توسط محاسبه‌ی نیرو بین جفت اتم‌های پیوندی، به‌علاوه نیروهای مربوط به برهمکنش‌های غیرپیوندی، به‌علاوه نیروهای خارجی و یا قیدی ارزیابی می‌شود. در مرحله‌ی سوم، حرکت اتم‌ها با حل عددی معادلات حرکت نیوتن شبیه‌سازی شده است و در مرحله‌ی چهارم موقعیت اتم‌ها، سرعت، انرژی، دما، فشار و غیره به عنوان خروجی ثبت خواهند شد [۲۶].

DNA خود به عنوان یک بیوپلیمر نسبتاً انعطاف‌پذیر است، اما در DNA اوریگامی، بسیاری از رشته‌های DNA در یک ساختار مکانیکی منسجم قرار می‌گیرند که یک هندسه‌ی به‌خوبی تعریف‌شده را حفظ می‌کند؛ بنابراین DNA اوریگامی، اشیاء نانو جدیدی با پیچیدگی هندسی سه‌بعدی‌ای را ایجاد کرده است [۲۷ و ۲۸].

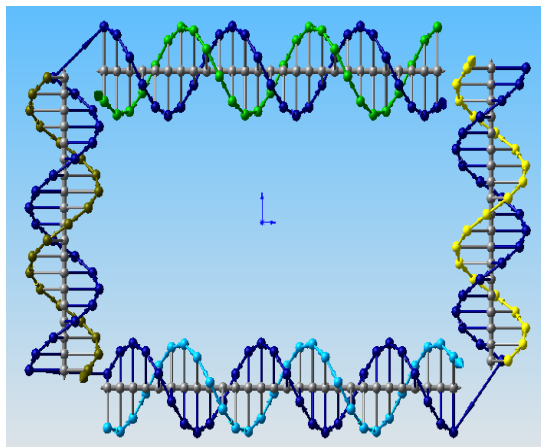
در سال‌های اخیر، از DNA اوریگامی برای ساخت انواع ساختارهای دوبعدی و سه‌بعدی برای کاربردهای مختلف استفاده شده است [۲۹]، مانند نانوپورها برای سنجش تک‌مولکولی^۱ [۳۰]، نانوسیله برای حمل دارو [۳۱ و ۳۲]. همچنین ساخت سازه‌های کاربردی مکانیکی، مانند فنرها، محرک‌ها می‌تواند حوزه‌ی نانوماشین‌های DNA را تا حد زیادی گسترش دهد که هنوز بسیاری از آن‌ها ناشناخته مانده است. به‌طور کلی، عملکرد مکانیکی نانوماشین‌های DNA به دو قابلیت کلیدی نیاز دارد: (۱) توانایی برای طراحی رفتار مکانیکی و (۲) توانایی یکپارچه‌سازی دینامیک (یعنی حرکت). در طراحی مهندسی، کنترل رفتار مکانیکی با استفاده از اجزای چند ماده‌ای با سفتی مکانیکی مطلوب قابل‌دستیابی است [۳۳]. سفتی اجزای DNA اوریگامی می‌تواند در مقیاس‌های گوناگون متفاوت باشد [۳۴].

۲-۲- تئوری دینامیک مولکولی

از زمانی که اولین شبیه‌سازی دینامیک مولکولی (MD) برای یک پروتئین انجام شد، بیش از ۳۰ سال می‌گذرد [۳۵]. MD برای مطالعه‌ی انواع سیستم‌های زیست‌مولکولی، از جمله پروتئین‌ها، نوکلئوتیدها، دولایه‌های لیپیدی و کربوهیدرات‌ها استفاده شده است [۳۶، ۳۷، ۳۸].

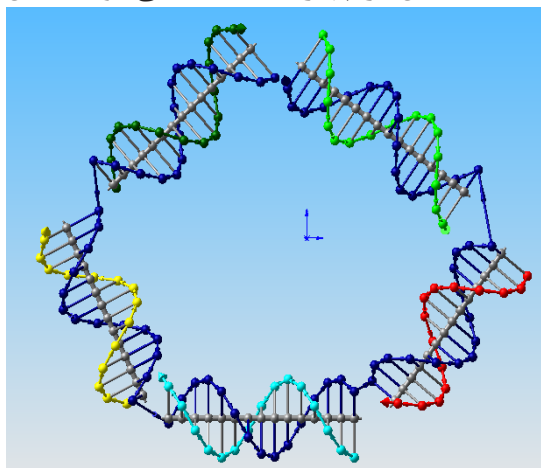
۱- Single-Molecule Sensing

۲- Force field



شکل ۷: طراحی DNA اوریگامی مستطیل در نرم افزار نانواپنجنیر

شکل پنج ضلعی شامل یک چهارچوب، پنج رشته‌ی کوتاه و ۷۴ جفت باز آلی می‌باشد که از ترکیبشان پنج DNA دورشته‌ای متصل در چهار نقطه ایجاد می‌شود (شکل ۸).



شکل ۸: طراحی DNA اوریگامی پنج ضلعی در نرم افزار نانواپنجنیر

و در نهایت، نمونه‌ی DNA اوریگامی مثلثی از ۴ تا شاخه‌ی A, B, C, D تشکیل شده است که در آن رشته‌ی A, B رشته‌ی اصلی و بلند و رشته‌ی C, D رشته‌ی فرعی، کوتاه و مکمل این ساختار محسوب می‌شوند (شکل ۹).

در این تحقیق، روش دینامیک مولکولی برای بررسی رفتار مکانیکی DNA اوریگامی مثلثی تحت دماهای مختلف مورد استفاده قرار گرفته است.

۳-موادها و روش‌ها

۳-۱- مدل سازی نانوسیله DNA اوریگامی

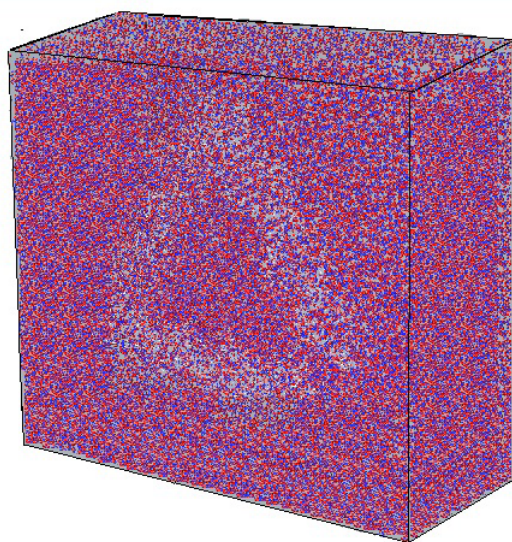
با توجه به پیشینه‌ی پژوهش‌ها می‌توان پی برد که به کمک ساختار اولیه‌ی DNA که دورشته‌ای می‌باشد، اشکال هندسی مختلفی را با نرم افزار نانواپنجنیر^۱ مدل سازی و با نرم افزار گرومکس^۲، شبیه سازی دینامیک مولکولی انجام داد و پس از بررسی رفتار مکانیکی و یا انعطاف پذیری این اشکال هندسی، می‌توان برای حمل انواع مختلفی از محموله‌ها مورد استفاده قرار داد.

در این مقاله، با استفاده از نرم افزار نانواپنجنیر، به طراحی سه شکل مستطیل، پنج ضلعی و مثلث تشکیل شده از DNA دورشته‌ای پرداخته شده است که مثلث طراحی شده مورد شبیه سازی دینامیک مولکولی قرار می‌گیرد. تمامی اشکال طراحی شده به وسیله‌ی این نرم افزار از رشته‌ی اصلی بلند تشکیل شده‌اند که چهارچوب خوانده می‌شود و بقیه‌ی رشته‌های کوتاه مکمل این چهارچوب می‌باشند. شکل مستطیل شامل یک چهارچوب، چهار رشته‌ی کوتاه و ۹۰ جفت باز آلی می‌باشد که از ترکیبشان چهار DNA دورشته‌ای متصل در سه نقطه ایجاد می‌شود (شکل ۷).

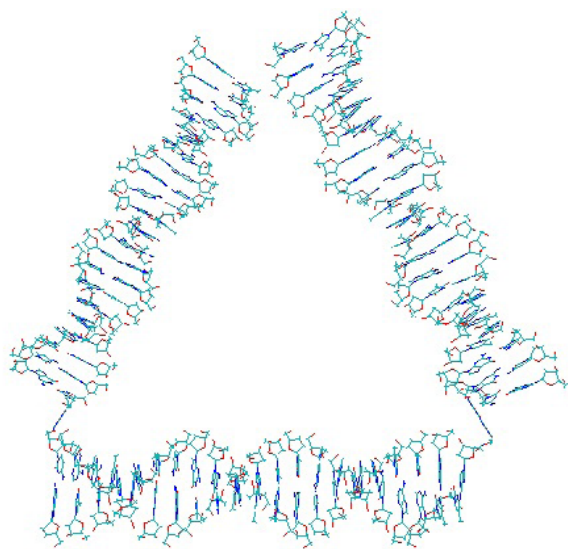
۱- Nano Engineer

۲- GROMACS

شبیه‌سازی در دمای آزمایشگاهی و با ۵۰۰۰۰۰ گام (۱ ns) انجام می‌شود. برای بررسی گرافیکی نتایج استخراج‌شده از دینامیک مولکولی نیز نرم‌افزار VMD^۵ مورد استفاده قرار گرفت. در شکل ۱۱، نمونه‌ی DNA اوریگامی مثلی قبل از شبیه‌سازی در نرم‌افزار VMD نمایش داده شده است.

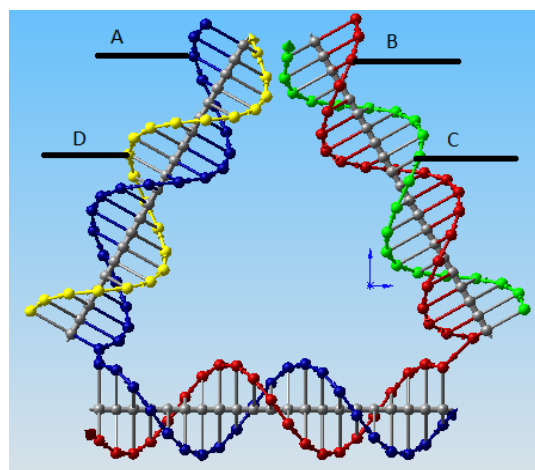


شکل ۱۰: DNA اوریگامی مثلی در جعبه‌ی آب



شکل ۱۱: نمونه‌ی DNA اوریگامی مثلی قبل از شبیه‌سازی در نرم‌افزار

VMD



شکل ۹: DNA اوریگامی مثلی طراحی شده در نرم‌افزار نانوانیجینر

۳-۲- شبیه‌سازی دینامیک مولکولی

برای انجام محاسبات در زمینه‌ی DNA، بسته‌های نرم‌افزاری مختلفی ارائه شده است. نرم‌افزارهایی برای آماده‌سازی و رفع نواقص DNA موجود می‌باشد که در این پژوهش از نرم‌افزارهای پایمول^۱ و SPDBV^۲ استفاده شده است.

برای انجام شبیه‌سازی دینامیک مولکولی، از نرم‌افزار گرومکس با میدان نیروی AMBER^{۹۴} و آب TIP3P استفاده شده است. برای انجام شبیه‌سازی، ابتدا DNA اوریگامی مثلی در جعبه‌ی آب چهاروجهی به فاصله‌ی مناسب از دیواره قرار داده شده است (شکل ۱۰). در نتیجه، جعبه شامل یک DNA اوریگامی مثلی و ۶۳۶۸۸ مولکول آب می‌باشد. در مدت شبیه‌سازی دینامیک مولکولی، الگوریتم LINCS برای مقیدکردن تمام پیوندها به کار گرفته شده است. از گام زمانی یک فمتوثانیه استفاده شده است. واکنش‌های الکترواستاتیک با استفاده از روش PME^۳ با شعاع قطع^۴ ۱٫۲ نانومتر ارزیابی شده‌اند. مینیمم‌سازی انرژی با ۵۱۲۵ گام انجام گرفته تا تماس‌های نابجا حذف شود. در نهایت، فرایند

۱- PyMol

۲- Swiss PDB Viewer

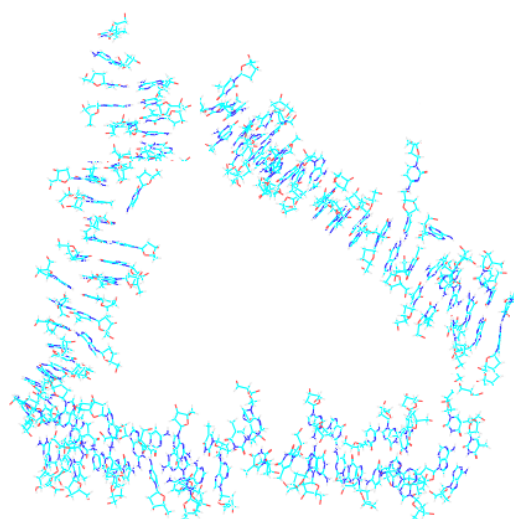
۳- Particle Mesh Ewald

۴- Cutoff

۵- Visual Molecular Dynamics

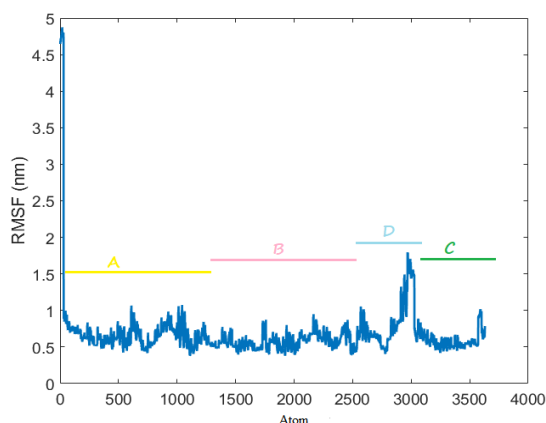
۴- نتایج و بحث

در این بخش، به بررسی رفتار مکانیکی نانوسیله پرداخته می‌شود. در شکل ۱۲، تغییرات ساختاری این نانوسیله مشاهده می‌شود.



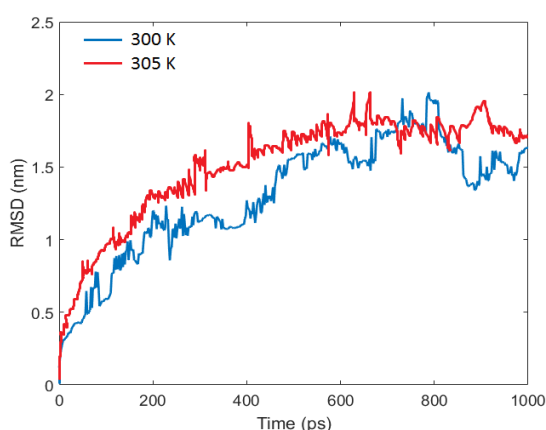
شکل ۱۲: تغییرات ساختاری نمونه‌ی DNA اورینگامی مثلثی بعد از شبیه‌سازی

تغییرات DNA حول شرایط تعادل وابسته به انعطاف‌پذیری محلی ساختاری DNA می‌باشد. قسمت‌هایی از DNA اورینگامی مثلثی دارای انعطاف‌پذیری زیاد و قسمت‌هایی از آن از انعطاف‌پذیری کمتری برخوردار می‌باشد. برای بررسی دقیق، انعطاف‌پذیری محلی بخش‌های مختلف DNA اورینگامی مثلثی و نیز استخراج بخش‌های با انعطاف‌پذیری بیشتر از RMSF^۱ کمک گرفته می‌شود. در شکل ۱۳، RMSF این نانوسیله با مشخص کردن ۴ تا شاخه که از شبیه‌سازی دینامیک مولکولی در شرایط دمایی آزمایشگاهی به دست آمده است، نشان داده شده است.



شکل ۱۳: نمودار انعطاف‌پذیری DNA اورینگامی مثلثی وابسته به اتم

RMSD^۲ که برای بررسی انحراف از ساختار اولیه استفاده می‌شود، معیاری از هم‌گرایی سیستم شبیه‌سازی شده است [۴۰]. برای بررسی بیشتر، یک بار در دمای K ۳۰۰ و بار دیگر با همان شرایط قبل در دمای K ۳۰۵ شبیه‌سازی انجام شده است که RMSD اتم‌ها در شکل ۱۴ نشان می‌دهد که شبیه‌سازی بعد از حدود ۸۰۰ ps به حالت تعادل رسیده است.



شکل ۱۴: نمودار پایداری DNA اورینگامی مثلثی وابسته به زمان نسبت به ساختار اولیه

۱- Root Mean Square Fluctuation

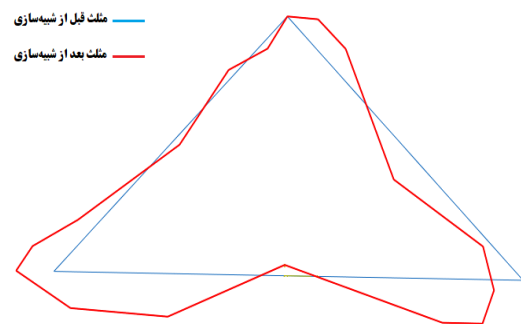
۲- Root-Mean-Square Deviation

نشان داد ساختار کلی شکل DNA اورینگامی مثلثی بعد از شبیه‌سازی دینامیک مولکولی تقریباً ثابت مانده است و نیز میزان تغییرات ساختاری DNA اورینگامی مثلثی تقریباً در ۸۰۰ پیکوثانیه نسبتاً به ثبات ساختاری رسیده است. همچنین در نتایج، نحوه‌ی انعطاف‌پذیری ۴ شاخه‌ی A، B، C، D نشان داده شد. درنهایت، با مقایسه‌ی سطح دهانه‌ی DNA اورینگامی مثلثی قبل از شبیه‌سازی و بعد از شبیه‌سازی، این نتیجه حاصل شد که سطح دهانه‌ی این نانوسیله تغییرات قابل‌توجهی نداشته است و می‌تواند به عنوان حاملی برای محموله‌ها مورد استفاده قرار گیرد.

۶- مراجع

- [1] A. Ghaffari, A. Shokuhfar, R. Hasanzadeh Ghasemi (2012) Capturing and releasing a nano cargo by Prefoldin nano actuator, Sensors and Actuators B: Chemical, Vol. 171, pp. 1199-1206.
- [2] Mavroidis C. (2006) Bio-Nano-Machines for Space Applications, Phase II NIAC Grant, Final Report.
- [3] M. Askarian, M. Moavenian, R. H. Ghasemi (2013) Prefoldin β 1: A New Bio-Nanorobots component, advanced science, Engineering and Medicine, Vol. 5, No. 9, pp. 895-904.
- [4] Howard J. (1996) The movement of kinesin along microtubules. Annu. Rev. Physiol. 58: 703-729.
- [5] Wang M.D., Schnitzer M.J., Yin H., Landick R., Gelles J., Block S. M. (1998) "Force and Velocity Measured for Single Molecules of RNA Polymerase", Science, 282, 902-907.
- [6] Sellers J.R. (2000) Myosins: a diverse superfamily. Biochimica et Biophys. Acta (BBA) — Mol. Cell Res. 1496: 3-22.

برای بررسی دقیق DNA اورینگامی مثلثی، با توجه به تغییر پیکربندی به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی‌های دینامیک مولکولی، سطح دهانه‌ی DNA اورینگامی مثلثی به‌صورت تابعی از دما به‌دست آورده شده است. این سطح با اتصال اتم‌ها در انتهای آمینواسیدهای هر بازو تعریف می‌شود (شکل ۱۵). سطح دهانه‌ی این نانوسیله به عنوان معیاری از تغییرات ساختاری و نیز معیاری برای بررسی شکل و اندازه‌ی محموله‌های قابل‌حمل می‌باشد و یک پارامتر مهم در بررسی نانوسیله فاصله‌ی بازوها نسبت به هم می‌باشد. درواقع، سه بازوی نانوسیله نسبت به هم دارای حرکت بوده و این حرکت فضای داخلی نانوسیله را دچار تغییر می‌کند.



شکل ۱۵: مقایسه‌ی دهانه‌ی DNA اورینگامی مثلثی، قبل از شبیه‌سازی و بعد از شبیه‌سازی

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، مدل‌سازی سه شکل مستطیل، پنج‌ضلعی و مثلثی با استفاده از DNA اورینگامی دورشته‌ای با کمک نرم‌افزار نانوبینجیر انجام شد و به بررسی انعطاف‌پذیری و پایداری DNA اورینگامی مثلثی به کمک شبیه‌سازی دینامیک مولکولی پرداخته شد. برای بررسی نتایج این مسئله، از نرم‌افزار دینامیک مولکولی گرومکس استفاده شد. برای بررسی بیشتر، شبیه‌سازی DNA اورینگامی مثلثی در دو دمای ۳۰۰ و ۳۰۵ کلوین انجام شد. نتایج

- [16] Douglas, S. M.; Bachelet, I.; Church, G. M. (2012) A Logic-Gated Nanorobot for Targeted Transport of Molecular Payloads. *Science* 335, 831–834.
- [17] Ke Y.; Meyer T.; Shih W. M. & Bellot G. (2016) Regulation at a distance of biomolecular interactions using a DNA origami nanoactuator. *Nature Communications*.
- [18] Sharma R., Schreck J. S., Romano F., Louis Ard A., and Jonathan P. K. Doye, (2017), "Characterizing the Motion of Jointed DNA Nanostructures Using a Coarse-Grained Model", *ACS Nano*, 11, 12426-12435.
- [19] Lee Ch., Lee J. Y., and Kim D.-N., (2017) "Polymorphic design of DNA origami structures through mechanical control of modular components", *NATURE COMMUNICATIONS*.
- [20] Khosravi, R., Ghasemi, R.H. & Soheilifard, R., (2020) Design and Simulation of a DNA Origami Nanopore for Large Cargoes. *Mol Biotechnol* 62, 423–432. <https://doi.org/10.1007/s12033-020-00261-z>
- [21] Mogheiseh, M., Hasanzadeh Ghasemi, R. and Soheilifard, R. (2021), "The effect of crossovers on the stability of DNA origami type nanocarriers", *Multidiscipline Modeling in Materials and Structures*, Vol. 17 No. 2, pp. 426-436. <https://doi.org/10.1108/MMMS-05-2020-0094>
- [22] Dastorani, S., Mogheiseh, M., Ghasemi, R. H., & Soheilifard, R. (2020). "Modeling and Structural investigation of a new DNA origami based flexible bio-nano joint". *Molecular Simulation*. <https://doi.org/10.1080/08927022.2020.1797019>
- [23] Dastorani, S., Ghasemi, R. H., & Soheilifard, R. (2021). "A Study on the Bending Stiffness of a New DNA Origami Nano-Joint". *Molecular Biotechnology*. <https://doi.org/10.1007/s12033-021-00367-y>.
- [7] Sack S., Muller J., Marx A., Thormahlen M., Mandelkow E.M. et al. (1997) X-ray structure of motor and neck domains from rat brain kinesin. *Biochemistry* 36: 16155
- [8] Berg H.C. and Anderson R.A. (1973) Bacteria swim by rotating their flagellar filaments. *Nature* 245:380–382.
- [9] Schalley C.A., Beizai K. and Vogtle F.K., (2001) "On the Way to Rotaxane-Based Molecular Motors: Studies in Molecular Mobility and Topological Chirality", *Accounts of Chemical Research*, 34, 465-476.
- [10] Erickson, H.P. (1997) "Stretching Single Protein Molecules: Titin is a Weird spring", *Science*, 276, 1090-1092.
- [11] Mahadevan L. and Matsudaira P. (2000) "Motility Powered by Supramolecular Springs and Ratchets", *Science*, 288, 95-99.
- [12] M. Keramati, R. Hasanzadeh Ghasemi (2016) Study of interaction between Prefoldin nano actuator and amyloid beta dimeric pathogenetic cargo with MD simulation, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 7, pp. 385-391. (in Persian)
- [13] A. Ghaffari, A. Shokuhfar, R. Hasanzadeh Ghasemi (2011) Prefoldin: a nano actuator for carrying the various size nano drugs, *Journal of Computational and Theoretical Nanoscience*, Vol. 8, No. 10, pp. 2078-2086.
- [14] Akinori Kuzuya, Yuichi Ohya (2014) Nanomechanical Molecular Devices made of DNA Origami, 1742-1749.
- [15] David M. Smith, Verena Schüller, Carsten Forthmann, Robert Schreiber, Philip Tinnefeld & Tim Liedl (2011) A Structurally Variable Hinged Tetrahedron Framework from DNA Origami, *Journal of Nucleic Acids* doi:10.4061/2011/360954.

- with Tunable Mechanical Properties,” *ACS Nano*, 8(1), pp. 27–34.
- [34] Tinland, B.; Pluen, A.; Sturm, J.; Weill, G. (1997) Persistence Length of Single-Stranded DNA. *Macromolecules*, 30, 5763–5765.
- [35] Fajer, M., Swift, R., McCammon, J.: (2009) Using multistate free energy techniques to improve the efficiency of replica exchange accelerated molecular dynamics. *J. Comp. Chem.* 30, 1719–1725
- [36] Brooks, C.L., Karplus, M., Pettit, B.M.: (1989) *Proteins: A Theoretical Perspective of Dynamics, Structure and Thermodynamics*. Wiley, New York
- [37] Karplus, M.: *Molecular dynamics: applications to proteins*. In: J.L. Rivail (ed.) (1990) *Modelling of Molecular Structures and Properties, Studies in Physical and Theoretical Chemistry*, vol. 71, pp. 427–461. Elsevier Science Publishers, Amsterdam. *Proceedings of an International Meeting*
- [38] McCammon, J.A., Harvey, S.C.: (1987) *Dynamics of Proteins and Nucleic Acids*. Cambridge University Press, Cambridge
- [39] Wang, Y., McCammon, J.A. (2012). Introduction to Molecular Dynamics: Theory and Applications in Biomolecular Modeling. In: Dokholyan, N. (eds) *Computational Modeling of Biological Systems. Biological and Medical Physics, Biomedical Engineering*. Springer, Boston, MA. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-2146-7_1
- [40] M. Talab F., Arab S. Sh., Mohammadian J. (2020) “Structural investigation of bacteriorhodopsin protein due to absorption of microwaves using molecular dynamics simulation”, *Madras Journal* , Vol. 7, Num. 2, P. 1-13, , (in Persian).
- [24] Seeman, N. C. *Nanomaterials Based on DNA*. *Annu. Rev. Biochem.* 2010, 79, 65–87.
- [25] Han, D.; Pal, S.; Nangreave, J.; Deng, Z.; Liu, Y.; Yan, H. *DNA Origami with Complex Curvatures in Three-Dimensional Space*. *Science*, 332, 342–346, 2011.
- [26] Daštórani, S., (2020). Design and simulation of biologically joints using DNA origami by molecular dynamics method, Degree of Master of Science (M.Sc.) in Mechanical Engineering, Hakim Sabzevari University.
- [27] Rothmund, P. W. K. (2006) Folding DNA To Create Nanoscale Shapes and Patterns. *Nature*, 440, 297–302,.
- [28] Castro, C. E.; Kilchherr, F.; Kim, D.-N.; Shiao, E. L.; Wauer, T.; Wortmann, P.; Bathe, M.; Dietz, H. A (2011) Primer to Scaffolded DNA Origami. *Nat. Methods*, 8, 221–229,.
- [29] Linko, V.; Dietz, H. (2013) The Enabled State of DNA Nanotechnology. *Curr. Opin. Biotechnol.*, 24, 555–561,.
- [30] Langecker, M.; Arnaut, V.; Martin, T. G.; Liš, J.; Renner, S.; Mayer, M.; Dietz, H.; Simmel, F. C. (2012) Synthetic Lipid Membrane Channels Formed by Designed DNA Nanostructures. *Science*, 338, 932–936,.
- [31] Douglas, S. M.; Bachelet, I.; Church, G. M. A (2012) Logic-Gated Nanorobot for Targeted Transport of Molecular Payloads. *Science*, 335, 831–834,.
- [32] Zadegan, R. M.; Jepsen, M. D. E.; Thomsen, K. E.; Okholm, A. H.; Schaffert, D. H.; Andersen, E. S.; Birkedal, V.; Kjems, J. (2012) Construction of a 4 Zeptoliters Switchable 3D DNA Box Origami. *ACS Nano*, 6, 10050–10053.
- [33] Zhou, L., Marras, A. E., Su, H.-J., and Castro, C. E., (2014), “DNA Origami Compliant Nanostructures

تحلیل خرابی میل بادامک موتور خودرو سواری شش سیلندر

کریم علی اکبری^{۱*} و جعفر لنگری^۲

۱-دانشیار؛ گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تهران، ایران.

۲-استادیار؛ گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بجنورد، بجنورد، ایران.

چکیده

میل بادامک‌ها وظیفه‌ی کنترل زمان‌بندی سوپاپ‌های ورودی و خروجی در زمان مناسب در موتورهای احتراق داخلی را به عهده دارند. در این مطالعه، تحلیل خرابی روی دو میل بادامک در خودرو شش سیلندر ساخته شده از چدن خاکستری انجام گردید. شکست خرابی یک میل بادامک پس از حدود ۱۷۷ هزار کیلومتر و دیگری پس از حدود ۲۰۸ هزار کیلومتر در بین بادامک ۱ و ۲ اتفاق افتاده بود. برای بررسی علت خرابی میل بادامک‌ها، ابتدا یک سری آزمایشات شامل تعیین ترکیب شیمیایی، ریزساختار، سختی‌سنجی و فرکتوگرافی انجام شد. مورفولوژی سطح شکست نشان داد که رشد ترک بین‌دانه‌ای از ناحیه‌ی تمرکز تنش و همراه با علائم جغجغه‌ای بوده است. نتایج سختی‌سنجی مقطع میل بادامک حداکثر ۱۵۵ سختی برینل اندازه‌گیری شد، در صورتی که مقادیر متوسط سختی سطح مناطق تحت عملیات حرارتی حداقل حدود ۴۸۰ برینل سختی پیشنهاد می‌گردد. نتایج بررسی نشان داد که پدیده‌ی شروع ترک و نهایتاً شکست بادامک می‌تواند بر اثر عواملی از قبیل اعمال بار بیش از حد، سختی پایین و وجود ناخالصی در ناحیه‌ی تمرکز تنش میل بادامک باشد.

کلمات کلیدی

مهندسی خودرو، شکست میل بادامک، ریزساختار، فرکتوگرافی، علت خرابی.

Failure analysis of six-cylinder passenger car engine camshaft

Karim Aliakbari^{1*}, Jafar Langari²

1- Department of Mechanical Engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran.

2- Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, University of Bojnord, Bojnord, Iran

Abstract

The camshafts are responsible for controlling the timing of the intake and exhaust valves at the right time in internal combustion engines. In this study, failure analysis was performed on two camshafts in a six-cylinder car made of gray cast iron. One camshaft failure occurred after about 177,000 kilometers and the other after about 208,000 kilometers between cam 1 and 2. In order to investigate the cause of cam failure, first, a series of tests including determination of chemical composition, microstructure, hardness measurement, and fractography were performed. The morphology of the fracture surface showed that the growth of the intergranular crack was from the zone of stress concentration and accompanied by ratchet marks. The hardness measurement results of the camshaft cross-section measured a maximum of 155 HB, while the average surface hardness values of the heat-treated surfaces are suggested to be at least 480 HB. The results of the investigation showed that the phenomenon of crack initiation and eventual failure of the cam can be caused by factors such as excessive load, low hardness, and the presence of impurities in the stress concentration zone of the camshaft.

Keywords

Automotive engineering, Camshaft fracture, Microstructure, Fractography, Failure cause.

۱- مقدمه

اکثر چدن‌ها دارای ترکیب شیمیایی ۲/۵-۴ درصد کربن، ۱-۳ درصد سیلیکون و بقیه آهن هستند. چدن خاکستری استحکام کششی و مقاومت ضربه‌ای کمتری نسبت به فولاد دارد، اما مقاومت فشاری آن با فولاد کم و متوسط کربن قابل مقایسه است. چدن‌ها در کاربردهای اجزای خودرو، مانند بلوک سیلندر، فلاپویل، جعبه‌دنده، منی‌فولد، ترمز دیسکی، میل‌لنگ و میل‌بادامک موتورهای احتراق داخلی استفاده می‌شود که ماشین‌کاری، میرایی ارتعاش، ظرفیت حرارتی، هدایت حرارتی و سختی بالا از مزایای آن هستند [۱]. وظیفه‌ی میل‌بادامک‌ها در موتورهای احتراق داخلی بازوبسته‌کردن سوپاپ‌های ورودی و خروجی هستند. اغلب میل‌بادامک‌ها از جنس فولاد و دارای سختی سطحی ایجادشده به روش عملیات حرارتی می‌باشند که به روش‌های آهنگری یا ریخته‌گری ساخته می‌شوند. میل‌بادامک‌ها بایستی دارای سختی سطحی بالا و سختی مغزی پایین جهت ضربه‌پذیری خوب باشند. شکست خستگی حاصل از بارهای خمشی و پیچشی بیشترین علل شکست میل‌بادامک‌ها در موتورهای احتراق داخلی می‌باشند [۲].

کوکو و ایکوویلو [۳] تأثیر ریزساختار را بر میکرومکانیسم‌های آسیب‌دیده در مورد ترک‌های خستگی بیش‌بار مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که افزایش سطح خسارت اثر بارزی در چدن‌های چکش‌خوار فریت و فریت پریلیت دارد، درحالی‌که چدن چکش‌خوار پریلیت هیچ انتقال معنی‌داری از پدیده‌ی خستگی به خرابی اضافه‌بار نداشت. گونزاگا [۴] تأثیر محتوای فریت و پریلیت بر خصوصیات مکانیکی سه چدن چکش‌خوار با ریزساختارهای متفاوت را مورد بررسی قرار داد. نتایج

نشان داد که عملکرد و استحکام کششی با افزایش محتوای پریلیت افزایش می‌یابد. وی و همکاران [۵] یک چدن خاکستری جدید با پولک‌های گرافیتی جهت‌دار با یک فرآیند تغییر شکل پلاستیک شدید تهیه کردند. پیشنهاد شده بود که پولک‌های گرافیتی با حل‌شدن کربن، مکانیسم اصلی در فرآیند تغییر شکل پلاستیک شدید است. پولک‌های گرافیتی جهت‌دار، قدرت کششی را بهبود بخشید و همچنین چکش‌خواری قابل‌توجهی به‌طور همزمان به‌دست آمد. ایکوویلو و کوکو [۶] بررسی کردند که تأثیر عناصر گرافیتی در انتشار ترک خستگی در یک چدن چکش‌خوار فریت وجود دارد، علاوه‌براین هیچ تأثیری بر خصوصیات مکانیکی ندارد. کوالینی و همکاران [۷] تأثیر ریزساختار در مقاومت در برابر انتشار ترک خستگی چدن چکش‌خوار تحت نسبت‌های مختلف تنش را نشان داد.

ناسف و همکاران [۸] تحلیل شکست شفت میل اسبک در ماشین سواری را بررسی کردند. این شفت در بین یکی از چهار سوراخ نگهدارنده‌ی شفت در سرسیلندر شکسته‌شده بود. مسافت کار موتور فقط قبل از شکست ۴۰۶۲۶ کیلومتر بود. نتایج تحقیقات آنان نشان داد که حضور میکروترک‌هایی در نزدیکی سوراخ نگهدارنده موجب خرابی شده است. این ترک‌ها ممکن است در اثر بارگذاری مکرر در طول سرویس و یا خنک‌شدن غیریک‌نواخت شفت در طول عملیات حرارتی باشد. بایرسکن و همکاران [۹] تحقیقاتی را بر روی بررسی شکست میل‌بادامک یک موتور اتومبیل ساخته‌شده از چدن کرومی انجام دادند. میل‌بادامک مورد بررسی بعد از یک دوره‌ی خیلی کوتاه مورد استفاده در خودرو می‌شکند. برای مشخص کردن عوامل شکست میل‌بادامک ریزساختار و ترکیب شیمیایی مواد میل‌بادامک تعیین گردیدند.

۴- بررسی خواص مکانیکی (تست‌های سختی).

۵- بررسی ریزساختار با استفاده از میکروسکوپ نوری و الکترونی روبشی.

۶- تحلیل عددی میدان تنش.

۷- بررسی علت خرابی شکست.

۲- روش بررسی کار تجربی

ترکیب شیمیایی عناصر تشکیل‌دهنده‌ی میل‌بادامک بر اساس استاندارد ۱۷-ASTM E۴۱۵ & ۱۰۸۶-ASTM E۱۴ [۱۱، ۱۲] توسط دستگاه اسپکتروفتومتر مدل SPECTROMAXx ساخت آلمان انجام شد. آزمایشات در دمای ۲۴ درجه‌ی سانتی‌گراد و رطوبت نسبی ۲۳٪، سه مرتبه تکرار شد.

ابتدا یک مقطع عرضی از محل شکست میل‌بادامک‌ها به ضخامت ۱۵ میلی‌متر بریده شد و از دو طرف ماشین‌کاری گردید. سپس سطح نمونه‌ها با استفاده از سنباده‌ی شماره‌ی ۶۰ تا شماره‌ی ۱۲۰۰ پرداخت گردید. پولیش‌کاری سطح نمونه‌ها توسط محلول آب و Al_2O_3 انجام پذیرفت و سپس توسط نیتال ۲ درصد اچ گردید. شستشو با الکل و خشک‌کردن با هوای داغ به عنوان مرحله‌ی پایانی پولیش‌کاری استفاده شد. تصاویر ریزساختاری با استفاده از میکروسکوپ نوری از نواحی مختلف سطح مقطع میل‌بادامک انجام گردید. پس از بررسی ریزساختار ماده، آزمون سختی‌سنجی بر اساس معیار برینل، طبق استاندارد ۱۷-ASTM: E۳۸۴ [۱۳] انجام شد. آزمون سختی‌سنجی روی نمونه‌های ۱ و ۲ به فواصل ۰/۵ میلی‌متری از یکدیگر با اعمال نیروی ۳۰ کیلوگرمی و در مدت‌زمان ۱۰ ثانیه سه مرتبه تکرار شد.

چندین بررسی فرکتوگرافی برای به‌دست‌آوردن شرایط شکست انجام گردید. تحلیل تنش به روش اجزای محدود برای تعیین نواحی تحت تنش بالا روی میل‌بادامک صورت گرفت. وانگ و همکاران [۱۰] پیش‌گویی خرابی خستگی میل‌بادامک را با روش‌های مدل‌سازی ترک مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها نتیجه گرفتند که این روش میزان حد خستگی ناشی از تمرکز تنش با استفاده از نظریه‌ی مکانیک شکست تحت شرایط مختلف بارگذاری خمشی و پیچشی می‌تواند پیش‌بینی کند.

در این مطالعه، بررسی شکست روی میل‌بادامک‌های خودرو سواری شش سیلندر ساخته‌شده از چدن خاکستری انجام شد. بیشتر تحقیقات دیگران تمرکز بر تحلیل خرابی در میل‌لنگ‌ها و شفت‌های تحت بارهای پیچشی و خمشی است. با توجه به مطالعه‌ی نویسندگان در زمینه‌ی تحلیل خرابی، تاکنون تحقیقی در مورد خرابی میل‌بادامک‌های ساخته‌شده از چدن خاکستری به روش تجربی و عددی در مجلات معتبر انجام نشده است؛ بنابراین کار حاضر کمک شایانی در زمینه‌ی تحلیل خرابی و طراحی میل‌بادامک‌ها برای شرکت‌های سازنده‌ی خودرو و پژوهشگران در این حوزه می‌نماید. در کار حاضر، علاوه بر تمرکز روی ریزساختار و خواص مکانیکی، توجه خاصی به تحلیل تنش و بررسی علت خرابی شده است که در تحقیقات دیگران کمتر به آن اشاره شده است.

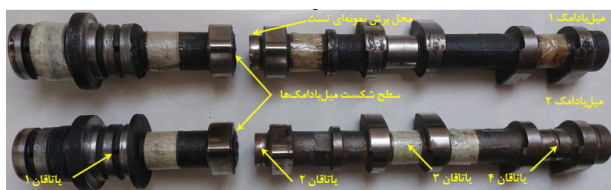
به‌طور خلاصه، ترتیب کارهای انجام‌شده در مطالعه‌ی کار حاضر به شرح زیر می‌باشد:

۱- انتخاب میل‌بادامک‌های شکسته‌شده.

۲- تجزیه و تحلیل ماکروساختار و اندازه‌گیری ابعاد.

۳- تجزیه و تحلیل ترکیب شیمیایی ماده‌ی میل‌بادامک.

یک میل بادامک پس از حدود ۱۷۷۰۰۰ کیلومتر و دیگری پس از حدود ۲۰۸۰۰۰ کیلومتر در ناحیه‌ی فیلت بین بادامک ۱ و ۲ شکسته شده بودند و همچنین مشخصات اندازه‌گیری‌شده‌ی آن در جدول ۲ لیست شده است.



شکل ۱: تصویر محل شکست میل بادامک مورد بررسی

جدول ۲: مشخصات میل بادامک و شرایط کار

جرم میل بادامک	طول میل بادامک	قطر یاتاقان میل بادامک	قطر داخلی محور اصلی	قطر دایره بادامک + ارتفاع بادامک	عملکرد میل بادامک شماره ۱	عملکرد میل بادامک شماره ۲
۱/۳۵ کیلوگرم	۳۹۵ میلی‌متر	۲۳ میلی‌متر	۱۰ میلی‌متر	۹+۳۵ میلی‌متر	۱۷۷۰۰۰ کیلومتر	۲۰۸۰۰۰ کیلومتر

۳-۱- ترکیب شیمیایی میل بادامک و خواص مکانیکی

نتایج میانگین اعداد برحسب درصد وزنی در جدول ۳ لیست شده است. با توجه به ترکیب شیمیایی ۳، همان‌طور که از نتایج ترکیب شیمیایی انتظار می‌رفت، چدن از نوع خاکستری فریتی - پرلیتی می‌باشد.

برای بررسی سطح شکسته‌شده‌ی میل بادامک‌ها، ابتدا نمونه‌های شکسته‌شده به مدت یک ساعت در حمام آلتراسونیک قرار گرفت و سپس توسط دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مدل LEO ۱۴۵۰ VP ساخت آلمان تصویربرداری شد. برای بررسی فراکتوگرافی از مقطع میل بادامک‌ها پس از شکست، تصاویر SEM تهیه گردید. ابتدا نمونه از میل بادامک‌های شکسته‌شده توسط ماشین وایرکات EDM برش زده شد و نمونه به مدت یک ساعت در حمام آلتراسونیک قرار داده شد و سپس توسط دستگاه SEM مدل LEO ۱۴۵۰ VP ساخت آلمان تصاویر با بزرگ‌نمایی‌های مختلف تهیه شد.

۳-۲ نتایج و بحث

مورد مطالعه در این تحقیق، بررسی شکست روی میل بادامک‌های خودرو سواری شش سیلندر است که مشخصات موتور آن در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱: مشخصات خودرو

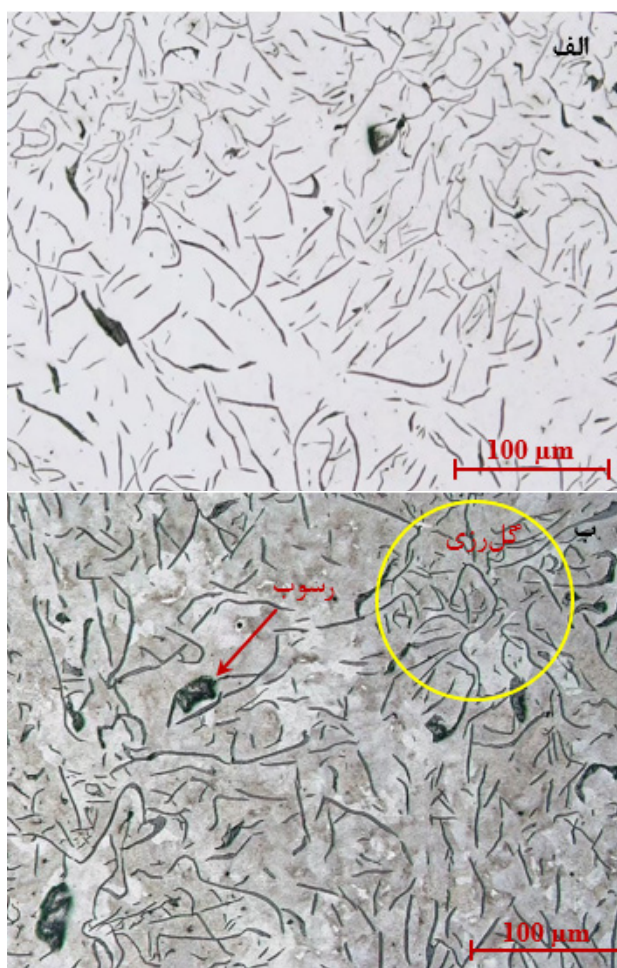
نوع موتور	ماکزیمم توان	ماکزیمم گشتاور	حجم جابه‌جایی
۶ سیلندر ۲۴ سوپاپه	۲۲۷ اسب بخار در دور ۶۴۰۰ دور بر دقیقه	۲۸۸ نیوتن متر در دور ۳۶۰۰ دور بر دقیقه	۳۰۰۰ سی سی

شکل ۱ محل شکست میل بادامک‌ها را نشان می‌دهد.

جدول ۳: ترکیب شیمیایی ماده‌ی مورد بررسی و ماده‌ی استاندارد چدن G15۰ [۱]

Cu	Mo	Ni	Cr	S	P	Mn	Si	C	Fe	
۰/۰۲۸	۰/۲۳۶	۰/۰۸۹	۰/۴۳۴	۰/۰۴۱	۰/۰۳۱	۰/۶	۲/۶۴	۳/۳۲	۹۲/۵	تحقیق حاضر
-	-	-	-	≤۰/۱۵	≤۰/۹	۰/۵-۰/۷	-۲/۸ ۲/۵	-۳/۴ ۳/۱	پایه	چدن G15۰

با توجه به تصاویر ۲، همان طور که از نتایج میکروگرافی انتظار می‌رفت، ریزساختار قطعه از نوع چدن خاکستری بین دو نوع A و B می‌باشد که پولک‌های گرافیت به‌طور یکنواخت پخش شده است و توزیع گل‌رزی هم در فواصل به‌صورت خفیف در زمینه ظاهر گردیده است. رسوبات در سطح قطعه به‌وفور در زمینه‌ی چدن مشاهده می‌شود که با توجه به هم‌پیوستگی جزئی پولک‌ها، در صورت اعمال بار، باعث شروع ترک اولیه و بر اثر بار سیکلی مطابق مراجع [۱۵-۱۷] انتشار می‌یابد.



شکل ۲: ریزساختار سطح مقطع عرضی میل‌بادامک؛ (الف) قبل از اچ، و (ب) بعد از اچ

شکل ۳ سختی‌سنجی در راستای شعاعی از شعاع داخلی به سمت شعاع خارجی در دو میل‌بادامک شکسته‌شده را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۳ نشان داده شده،

با مقایسه‌ی نتایج ترکیب شیمیایی با ماده‌ی استاندارد، می‌توان مشاهده نمود که ترکیب شیمیایی در محدوده‌ی چدن G150 با ساختار فریتی - پرلیتی می‌باشد که از نظر خواص مکانیکی در محدوده‌ی پایین‌ترین چدن‌ها قرار می‌گیرد. خواص مکانیکی شامل استحکام کششی، استحکام فشاری، مدول الاستیسیته، نسبت پواسون و سختی چدن حاضر به‌ترتیب برابر ۱۵۰ مگاپاسکال، ۶۰۰ مگاپاسکال، ۱۰۰ گیگاپاسکال، ۰/۲۴ و مقادیر سختی بین ۱۶۷ - ۱۳۶ برینل سختی است [۱].

۳-۲- میکروگراف نوری و سختی‌سنجی

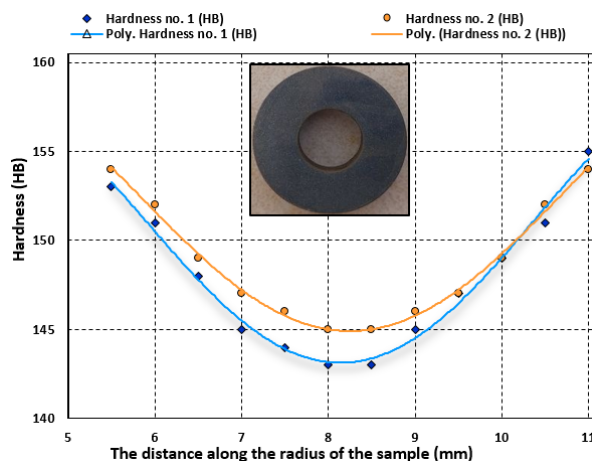
شکل ۲ ریزساختار نمونه از نوع فریتی با پرلیتی جزئی را قبل از اچ و بعد از اچ نشان می‌دهد. مطابق با استاندارد ASTM-A247 [۱۴]، نحوه‌ی توزیع ورقه‌های گرافیت در ساختمان میکروسکوپی چدن‌های خاکستری به پنج دسته تقسیم می‌شود که از A تا E نام‌گذاری شده‌اند. در نوع A، لایه‌های گرافیت به‌طور یکنواخت در زمینه پخش می‌شوند، منتها دارای جهات خاصی نمی‌باشند. در نوع B، توزیع گرافیت‌های لایه‌ای اصولاً به توزیع گل‌رزی (Rosette) موسوم است و معمولاً در چدن‌ها، با ترکیب شیمیایی نزدیک به یوتکتیک که انجماد آن‌ها با تعداد معدودی جوانه انجام گیرد، دیده می‌شود. در مرکز هر مجموعه‌ی گرافیت، لایه‌ها نازک و ظریف می‌باشند. علت این امر تحت انجماد موقتی است که در شروع انجماد به‌وجود می‌آید. سپس با آزادشدن گرمای نهان انجماد، درجه‌ی حرارت مذاب افزایش یافته و تحت انجماد موقتی از بین می‌رود؛ بنابراین ادامه‌ی انجماد در درجه‌ی حرارت معمولی انجام گرفته و در نتیجه لایه‌های گرافیت خارجی در هر مجموعه ضخیم‌تر و درشت‌تر خواهند شد. از نظر ابعاد، این نوع توزیع گرافیت در مقاطع نازک (در حدود ۱۰ میلی‌متر) و بر روی سطوح مقاطع متوسط دیده می‌شود و گاهی نیز ناشی از عملکرد ضعیف جوانه‌زها می‌باشد.

برشی، خمشی، خستگی یا پیچشی؛ طبیعت سیستم تنش؛ مقدار و منشأ؛ وجود تمرکز تنش؛ فاکتورهای محیطی و فاکتورهای ماده است. شکست‌های نوع چکش‌خوار که خستگی سیکل بالا را طی می‌کنند، از سه ناحیه شامل ناحیه‌ی شروع ترک، ناحیه‌ی رشد ترک خستگی همراه با علائم ساحلی و خطوط شعاعی و ناحیه‌ی شکست سریع نهایی تشکیل می‌گردد [۱۸-۲۳]. شکل ۴ تصاویر میکروسکوپی سطح شکست میل‌بادامک‌های شماره‌های ۱ و ۲ را نشان می‌دهند. مورفولوژی سطوح شکست در هر دو نمونه نشان می‌دهند که بارگذاری از نوع تنش سیکل پایین می‌باشد و از دو ناحیه شامل ناحیه‌ی شروع ترک A و ناحیه‌ی شکست سریع نهایی B همراه با علائم جغجغه‌ای کوچک تشکیل شده است.



شکل ۴: تصاویر میکروسکوپی سطح شکست؛ (الف) نمونه‌ی ۱، و (ب) نمونه‌ی ۲.

مقدار ماکزیمم سختی ماده‌ی میل‌بادامک شماره‌ی یک و دو به ترتیب برابر ۱۵۵ و ۱۵۴ سختی برینل می‌باشد که در محدوده‌ی سختی ماده‌ی استاندارد G۱۵۰ [۱]، برای حالت بدون عملیات حرارتی می‌باشد. برای میل‌بادامک‌های مطابق مراجع [۲، ۹]، متوسط سختی سطح مقطع برابر ۲۴۰ برینل سختی (۲۳ HRC) گزارش گردید و در صورتی که مقادیر متوسط سختی لایه‌ی سطحی تحت عملیات حرارتی بین ۴۸۵ تا ۵۷۰ برینل سختی (۵۶-۵۰ HRC) ثبت گردیده است. پس می‌توان نتیجه‌گیری کرد که مقدار سختی‌های اندازه‌گیری‌شده‌ی میل‌بادامک‌های کار حاضر از مقدار سختی استاندارد به کاررفته در میل‌بادامک‌ها پایین‌تر است.

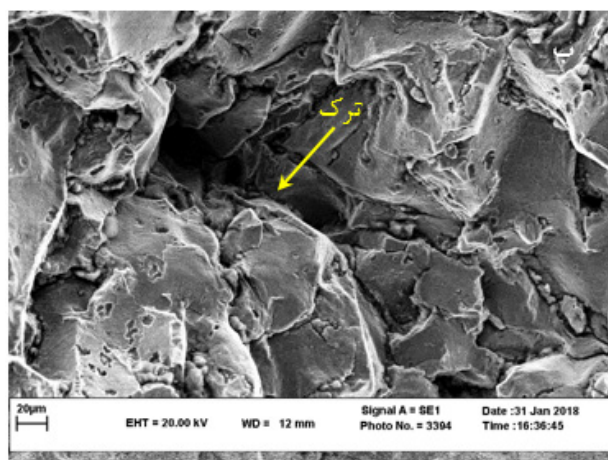
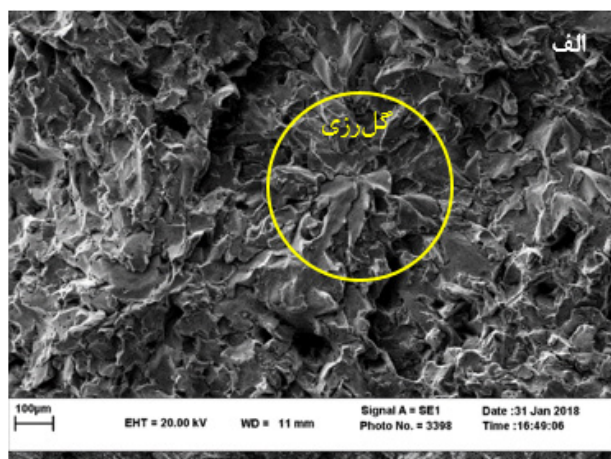


شکل ۳: سختی‌سنجی در راستای شعاعی از شعاع داخلی به سمت شعاع خارجی در دو میل‌بادامک شکسته‌شده

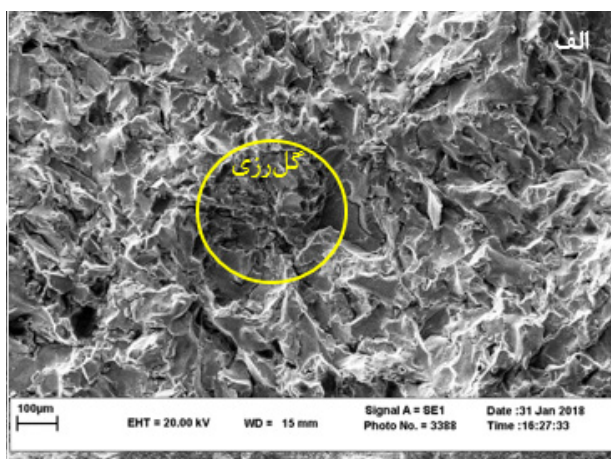
۳-۳- بررسی سطح شکست

هدف اولیه‌ی علم شکست‌شناسی پیدا کردن منشأ ترک است و برای آنالیز صحیح خرابی، امری ضروری است و علائم شکست شکل‌گرفته برای بررسی علت خرابی استفاده می‌گردد. شروع و گسترش شکست علائم مشخصی را بر روی سطوح شکست از خود بجا می‌گذارد که جهت گسترش ترک را نشان می‌دهند و از این علام جهت منشأ ترک مورد بررسی قرار می‌گیرند. ظهور این علائم روی سطوح ترک تابعی از نوع بارگذاری کششی،

توزیع می‌شود و اثر کلیواژ بر روی ماتریس را افزایش می‌دهد؛ بنابراین استحکام نهایی چدن خاکستری کم است.



شکل ۵: تصویر SEM از رشد ترک بین دانه‌ای در نمونه‌ی شماره ۱ با بزرگنمایی: (الف) $\times 250$ و (ب) $\times 1000$.



برای بررسی دقیق‌تر منشأ ترک، با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)، از سطوح شکست تصاویر با بزرگنمایی‌های مختلف تهیه شدند که در شکل‌های ۵ و ۶ نمایش داده شده‌اند. از شکل مشاهده می‌شود که سطح شکست چدن خاکستری ویژگی‌های شکست کلیواژ ساختار گرافیت پولکی نوع A و B و به علاوه ماتریسی را نشان می‌دهد که حفره‌های زیادی روی سطح شکست وجود دارد. مطابق پژوهش مراجع [۲۴، ۲۵]، اعتقاد بر این است که به نظر می‌رسد این حفره‌ها ریزتخلخل هستند که در طول انجماد چدن خاکستری ایجاد شده‌اند و محققان معتقدند که شکست چدن خاکستری ناشی از کلیواژ گرافیت یا جدایی سطحی بین گرافیت و ماتریس است. علاوه بر این از شکل مشاهده می‌شود که گرافیت گل‌شکل بیشتری در سطح شکست چدن خاکستری وجود دارد. مطابق پژوهش مراجع [۲۶-۲۸]، باور بر این است که در یک خوشه‌ی یوتکتیک، مورفولوژی سه بعدی گرافیت پولکی به شکل گل رز است و محصولات تبدیل آستنیت یوتکتیک (پرلیت یا پرلیت + فریت) بین گل‌ها توزیع می‌شود. از آنجایی که استحکام گرافیت تقریباً صفر است، هنگامی که آلیاژ تحت تنش است، موقعیت گرافیت معادل منبع ترک است و ترک قبل از ماتریس اتفاق می‌افتد. پس از ترک‌های گرافیت، ترک‌ها به سمت ساختار ماتریس منتشر می‌شوند، تا زمانی که گرافیت در قسمت جلو ترک همچنان به انتشار ترک ادامه می‌دهد که در نهایت منجر به شکست چدن خاکستری می‌شود. هنگامی که ترک در ماتریس منتشر می‌شود، ماتریس مانع انتشار آن می‌شود، به طوری که چدن خاکستری تنها دارای استحکام نهایی خاصی است. با این حال، در چدن خاکستری، گرافیت پولکی در ماتریس چدن خاکستری

که m و α به ترتیب جرم و شتاب مکانیزم سوپاپ می باشند. نیروی وزن F_g از معادله ی (۳) می تواند به صورت زیر محاسبه شود:

$$F_g = mg \quad (۳)$$

نهایتاً نیروی نرمال اعمال شده به میل بادامک F_N ، از معادله ی (۴) محاسبه می گردد.

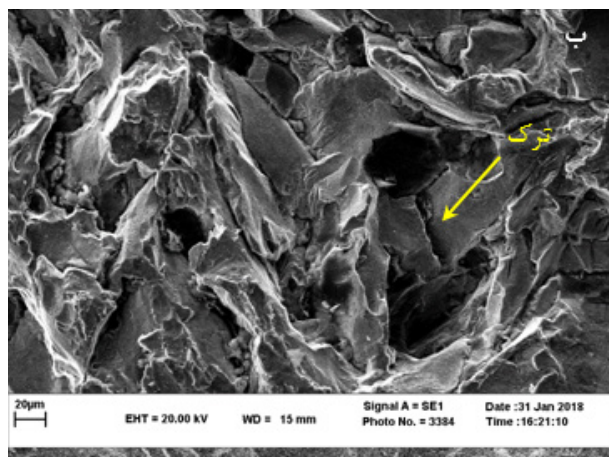
$$F_N = \frac{P}{\cos \alpha} \quad (۴)$$

$$P = F_s + F_1 + F_g + F_f \quad (۵)$$

که α زاویه ی فشار می باشد. در تحلیل ساده، نیروی وزن و نیروی اصطکاک در مقایسه با نیروهای اینرسی و فنر ناچیز فرض می شود و معادله ی (۴) به صورت معادله ی (۶) ساده سازی می شود.

$$F_N = \frac{F_I + F_s}{\cos \alpha} \quad (۶)$$

در مطالعه ی حاضر مش بندی، انتخاب نوع المان، شرایط مرزی، روش بارگذاری و تحلیل تنش بر اساس مراجع [۲۹،۳۰] انجام شد. ابتدا با نرم افزار SOLIDWORKS مدل سه بعدی تهیه شد و سپس توسط نرم افزار Abaqus تحلیل گردید. شکل ۷ نحوه ی اعمال بارگذاری، شرایط مرزی و مش بندی را در میل بادامک نشان می دهد. همان طور که در شکل ۷ الف نشان داده شده است، به دلیل اینکه برای هر سیلندر دو سوپاپ ورودی و دو سوپاپ خروجی به طور همزمان باز و بسته می گردد؛ بنابراین نیروی اعمالی برابر به بادامک ها اعمال گردیده است و شرایط مرزی به عنوان جابه جایی در محل قرارگیری یاتاقان های میل بادامک اعمال شده است. مقدار



شکل ۶: تصویر SEM از رشد ترک بین دانه های در نمونه ی شماره ۲ با بزرگ نمایی؛ (الف) $\times 250$ ، و (ب) $\times 1000$.

۳-۴- تحلیل تنش

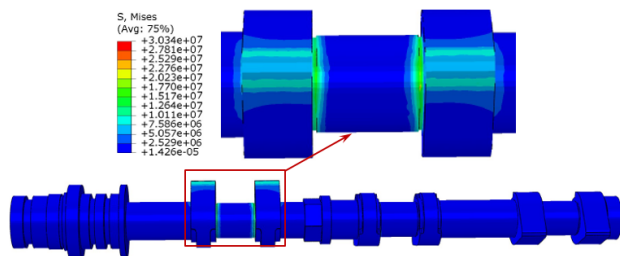
برای تعیین نقاط تمرکز تنش در ناحیه ی شکست با روش المان محدود (FEM)، تجزیه و تحلیل تنش میل بادامک انجام شد. برای تحلیل صحیح تنش، ابتدا نیاز به شناخت کافی از نیروهای عمل کننده روی میل بادامک است. نیروهای اعمالی به میل بادامک شامل نیروی اصطکاک F_f ، نیروی فنر F_s ، نیروی اینرسی F_I و نیروی وزن F_g می باشند. نیروی اصطکاک F_f حاصل ضرب نیروی نرمال N و ضریب اصطکاک برشی f است که بین بادامک و پیرو عمل می کند. نیروی اصطکاک F_f به دلیل ناچیز بودن نادیده گرفته شده است. نیروی فنر F_s اعمال شده به میل بادامک مطابق قانون هوک به صورت معادله ی (۱) دنبال می شود [۲۹].

$$F_s = k \Delta y \quad (۱)$$

که k و Δy به ترتیب سفتی و فشردگی در هنگام بلند شدن فنر می باشند. نیروی اینرسی F_I از معادله ی (۲) می تواند به صورت زیر محاسبه گردد:

$$F_I = ma \quad (۲)$$

شکل ۸ میدان توزیع تنش فون میزس حاصل از حداکثر نیروی اعمالی در میل بادامک را نشان می‌دهد. توزیع تنش فون میزس در نقطه‌ی تمرکز تنش محل شکست میل بادامک برابر مقدار ۳۰/۳۴ مگاپاسکال است که حدود ۲۳ درصد تنش تسلیم ماده میل بادامک است.



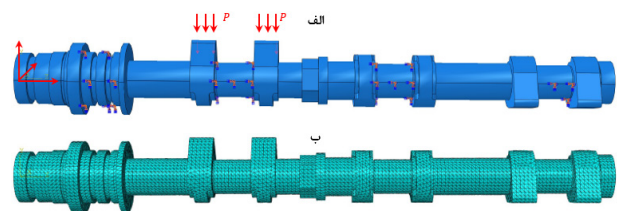
شکل ۸: توزیع تنش فون میزس در میل بادامک.

جدول ۵ نسبت تنش فون میزس مواد مورد استفاده در میل بادامک کار حاضر با میل بادامک شکسته‌شده‌ی تحقیقات دیگران [۹] را مقایسه می‌کند که تقریباً مشابه کار فعلی می‌باشد. همان‌طور که نتایج جدول ۵ نشان می‌دهد، نسبت درصد تنش فون میزس به تنش تسلیم در میل بادامک کار حاضر نسبت به میل بادامک از نوع چدن کروی بیشتر است و این نشان می‌دهد که در معرض تنش بیشتری قرار دارد.

جدول ۵: مقایسه‌ی تحلیل تنش میل بادامک کار حاضر و تحقیقات دیگران

ایتم	تنش تسلیم (MPa)	تنش ون میزس (MPa)	نسبت تنش ون میزس به تسلیم (%)
میل بادامک کار حاضر	۱۳۰	۳۰	۲۳
میل بادامک چدن کروی [۹]	۴۵۰	۶۲	۱۴

نیروی اعمال‌شده از حاصل جمع نیروی فنر (حداکثر جابه‌جایی و سختی فنر) و نیروی اینرسی (جرم و شتاب مکانیزم سوپاپ) به مقدار ۵۷۷ نیوتن می‌باشد. با توجه به پیچیدگی هندسی میل بادامک از قبیل فیلت، قوس سر بادامک و شیارها، از مش‌بندی چهاروجهی ۱۰ گره‌ای استفاده گردیده است.



شکل ۷: مدل‌سازی میل بادامک؛ (الف) اعمال بارگذاری و شرایط مرزی، و (ب) مش‌بندی.

جدول ۴ حل مسئله را از نظر تعداد اجزا و حداکثر تنش فون میزس برای میل بادامک نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، مناسب‌ترین تعداد اجزا ۷۱۴۹۸ جزء برای میل بادامک است که حداکثر تنش فون میزس ایجادشده در چرخ‌ها برابر با ۳۰/۳۴ مگاپاسکال است.

جدول ۴: نتایج مدل‌سازی اجزای محدود برای تعداد المان مختلف در میل بادامک.

مرحله‌ی	تعداد المان مختلف در میل بادامک	ماکزیمم تنش فون میزس (MPa)
۱	۵۳۳۸۲	۳۳/۳۲
۲	۵۷۹۹۳	۳۱/۴۵
۳	۵۸۶۷۹	۳۰/۶۸
۴	۶۵۷۶۱	۳۰/۱۹
۵	۷۱۴۹۸	۳۰/۳۴
۶	۷۷۹۶۲	۳۰/۴۷

۴- بررسی علت خرابی میل بادامک

با توجه به تحلیل‌های فوق، روش تحلیل خرابی میل بادامک به شرح زیر است:

تصاویر شکل ۱ نشان می‌دهند که میل بادامک‌ها با کارکردهای ۱۷۷ و ۲۰۸ هزار کیلومتر در حین کار دچار شکست شده‌اند. ابتدا مجموعه‌ای از آزمایشات شامل ترکیب شیمیایی، خواص مکانیکی، ریزساختار، سختی و فراکتوگرافی با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) برای میل بادامک انجام شد و در نهایت تحلیل تنش برای میل بادامک به صورت عددی انجام شد.

نتایج موارد فوق نشان داد که ماده‌ی مورد استفاده در میل بادامک چدن خاکستری با گرید G۱۵۰ می‌باشد. تجزیه و تحلیل تنش نشان داد که بیشترین میزان تنش در میل بادامک حدود ۳۰ مگاپاسکال در ناحیه‌ی فیلت بود که حدود ۲۳ درصد تنش تسلیم مواد میل بادامک بود که نسبت به میل بادامک مشابه بیشتر است.

می‌توان نتیجه گرفت که ماده‌ی انتخاب شده برای میل بادامک‌های کار حاضر مطابق ماده‌ی استاندارد است. از سوی دیگر، نتایج نشان داد که سخت شدن میل بادامک با حدود ۱۵۵ سختی برینل به درستی تحت عملیات حرارتی عمیق قرار نگرفته یا از سختی القایی استفاده نشده است. برای میل بادامک‌های مطابق مراجع [۲،۹]، متوسط سختی سطح مقطع برابر ۲۴۰ برینل سختی (۲۳ راکول سی سختی) گزارش گردید و در صورتی که مقادیر متوسط سختی لایه‌ی سطحی تحت عملیات حرارتی بین ۴۸۵ تا ۵۷۰ برینل سختی (۵۰ تا ۵۶ راکول سی سختی) ثبت گردیده است. علاوه بر این، وجود ناخالصی در ساختار ماده باعث رشد ترک می‌گردد که به نوبه‌ی خود استحکام

خستگی را کاهش می‌دهد. همچنین همان‌طور که در شکل ۱ نشان داده شده است، به دلیل سختی کم، روغن ناکافی و اضافه بار روی موتور، یک سری خط و خش روی میل بادامک دیده می‌شود.

با توجه به موارد فوق می‌توان نتیجه گرفت که سختی کم، روغن ناکافی و اضافه بار روی موتور باعث شروع ترک و وجود ناخالصی در ماده باعث انتشار ترک‌های خستگی در میل بادامک‌ها شده است.

برای اطمینان از عمر خستگی بالا و جلوگیری از خرابی زودرس، استفاده از میل بادامک چدن‌های خاکستری با گرید بالاتر و کروی به دلیل استحکام بالا و همچنین افزایش سختی سطح میل بادامک توصیه می‌شود؛ بنابراین یکی دیگر از روش‌های جلوگیری از خرابی زودرس کنترل دقیق فشار روغن و کاهش اضافه بار روی موتور است که می‌تواند طول عمر خستگی را در میل بادامک افزایش داده و از خرابی میل بادامک‌ها جلوگیری کند.

۵- نتیجه گیری

مطالعه با در نظر گرفتن خرابی میل بادامک‌ها با کارکرد ۱۷۷ و ۲۰۸ هزار کیلومتر در حین کار خودرو سواری بنزینی شش سیلندر انجام شد و نتایج زیر به دست آمد.

۱- نتایج ترکیب شیمیایی تأیید می‌کند که ماده‌ی مورد استفاده در میل بادامک مطابق استاندارد از گرید G۱۵۰ است. از سوی دیگر، نتایج نشان داد که سخت شدن میل بادامک به درستی تحت عملیات حرارتی عمیق قرار نگرفته یا از سختی القایی استفاده نشده است.

۲- بررسی با میکروسکوپ نوری نشان داد که ریزساختار چدن خاکستری نوع A از نوع فریتی - پرلیتی است.

۶- منابع

- [1] Elliott R. Cast iron technology. London: Butterworths; 1988.
- [2] Yamagata H. 5 - The camshaft. In: Yamagata HBT-TS and T of M in AE, editor., Woodhead Publishing; 2005, p. 110-31. <https://doi.org/https://doi.org/10.1533/9781845690854.110>.
- [3] Di Cocco V, Iacoviello F. Ductile cast irons: Microstructure influence on the damaging micromechanisms in overloaded fatigue cracks. Eng Fail Anal 2017;82:340-9. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2017.06.039>.
- [4] Gonzaga RA. Influence of ferrite and pearlite content on mechanical properties of ductile cast irons. Mater Sci Eng A 2013;567:1-8. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.msea.2012.12.089>.
- [5] Wang W, Jing T, Gao Y, Qiao G, Zhao X. Properties of a gray cast iron with oriented graphite flakes. J Mater Process Technol 2007;182:593-7. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.09.028>.
- [6] Iacoviello F, Cocco V Di. Influence of the graphite elements morphology on the fatigue crack propagation mechanisms in a ferritic ductile cast iron. Eng Fract Mech 2016;167:248-58. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2016.03.041>.
- [7] Cavallini M, Di Bartolomeo O, Iacoviello F. Fatigue crack propagation damaging micromechanisms in ductile cast irons. Eng Fract Mech 2008;75:694-704. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2007.02.002>.
- [8] Nassef GA, Elkhatib A, Yakout M. Analysis of a failed rocker arm shaft of a passenger car engine. Case Stud Eng Fail Anal 2016;5:10-4.
- [9] Bayrakceken H, Uzun I, Tasgetiren S. Fracture analysis of a camshaft made from nodular cast iron.
- وجود ناخالصی‌ها در ماتریس باعث ناپیوستگی ماتریس می‌شود و منجر به کاهش برخی از خواص مکانیکی چدن خاکستری می‌گردد و این به نوبه‌ی خود باعث کاهش استحکام خستگی می‌شود.
- ۳- مورفولوژی سطوح شکست در هر دو نمونه نشان داد که بارگذاری از نوع تنش سیکل پایین می‌باشد و از دو ناحیه شامل ناحیه‌ی شروع ترک و ناحیه‌ی شکست سریع نهایی همراه با علائم جغجغه‌ای کوچک تشکیل شده است.
- ۴- تجزیه و تحلیل تنش عددی نشان داد که بیشترین تنش با حدود ۲۳ درصد تنش تسلیم در ناحیه‌ی فیل میل‌بادامک است که در آن شکست رخ داده است.
- ۵- تجزیه و تحلیل فراکتوگرافی نشان داد سطح شکست چدن خاکستری ویژگی‌های شکست کلیواژ ساختار گرافیت پولکی نوع A و B و به‌علاوه ماتریسی را دارد. همچنین نتایج مشاهدات نشان داد که گرافیت گل‌رزی شکل بیشتری در سطح شکست چدن خاکستری وجود دارد.
- ۶- با توجه به اینکه ماده‌ی انتخاب‌شده برای میل‌بادامک چدنی کار حاضر مطابق استاندارد انتخاب شده است، اما برای اطمینان از عمر خستگی بالا و جلوگیری از خرابی زودرس، استفاده از میل‌بادامک چدن خاکستری گرید بالا و چدن کرومی به‌دلیل استحکام بالا و همچنین افزایش سختی سطح میل‌بادامک اصلی توصیه می‌شود.
- ۷- به‌دلیل روغن ناکافی و اضافه‌بار روی موتور، یک‌سری خط‌وخش روی میل‌بادامک دیده می‌شود؛ بنابراین یکی دیگر از روش‌های جلوگیری از خرابی زودرس کنترل دقیق فشار روغن و کاهش بار روی موتور است که می‌تواند طول عمر خستگی را در میل‌بادامک افزایش داده و از خرابی میل‌بادامک جلوگیری کند.

- of fatigue crack growth in cylinder head bolts of gasoline engine based on experimental data. *J Brazilian Soc Mech Sci Eng* 2020;42. <https://doi.org/10.1007/s40430-020-02326-1>.
- [20] Infante V, Silva JM, Silvestre MAR, Baptista R. Failure of a crankshaft of an aeroengine: A contribution for an accident investigation. *Eng Fail Anal* 2013;35:286–93.
- [21] Aliakbari K. Failure Analysis of Ductile Iron Crankshaft in Four-Cylinder Diesel Engine. *Int J Met* 2021. <https://doi.org/10.1007/s40962-020-00550-y>.
- [22] Fonte M, Li B, Reis L, Freitas M. Crankshaft failure analysis of a motor vehicle. *Eng Fail Anal* 2013;35:147–52. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2013.01.016>.
- [23] Aliakbari K. Experimental and numerical analysis of fatigue crack growth in carbonized bolts of gasoline engine cylinder head. *J Mech Eng* 2022;51:423–32. (in Persian)
- [24] Farrahi GH, Hassani Gangaraj SM, Abolhassani S, Hemmati F, Sakhaei M. Failure analysis of a four cylinder diesel engine crankshaft made from nodular cast iron. *J Engine Res* 2011;22:21–8.
- [25] Abreu M, Sundberg J, Elfsberg J, Jonsson S. Morphology and mechanisms of cavitation damage on lamellar gray iron surfaces. *Wear* 2020;456:203324.
- [26] Ferro P, Borsato T, Bonollo F, Padovan S. A rapid approach to estimate the mechanical properties of grey cast iron castings. *Acta Metall Slovaca* 2018;24:213–22.
- [27] Zhao X, Wang J, Jing T. Gray cast iron with directional graphite flakes produced by cylinder covered compression process. *J Iron Steel Res Int* 2007;14:52–5.
- Eng Fail Anal* 2006;13:1240–5.
- [10] Wang G, Taylor D, Bouquin B, Devlukia J, Ciepalowicz A. Prediction of fatigue failure in a camshaft using the crack modelling method. *Eng Fail Anal* 2000;7:189–97.
- [11] ASTM E415 - 17. Standard Test Method for Analysis of Carbon and Low-Alloy Steel by Spark Atomic Emission Spectrometry. Philadelphia: ASTM International; 2017. <https://doi.org/10.1520/E0415-17>.
- [12] ASTM E1086 - 14. Standard Test Method for Analysis of Austenitic Stainless Steel by Spark Atomic Emission Spectrometry. West Conshohocken, PA: ASTM International; 2014. <https://doi.org/10.1520/E1086-14>.
- [13] ASTM E384 - 17. Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials. West Conshohocken, PA: ASTM International; 2017. <https://doi.org/10.1520/E0384-17>.
- [14] ASTM A247 –19. Standard Test Method for Evaluating the Microstructure of Graphite in Iron Castings1. West Conshohocken, Pennsylvania: ASTM International; 2019.
- [15] Goodrich GM. Cast iron microstructure anomalies and their causes. *AFS Trans* 1997;105:669–83.
- [16] Leach PW, Borland DW. The unlubricated wear of flake graphite cast iron. *Wear* 1983;85:257–66.
- [17] Avcı A, İlkaya N, Şimşir M, Akdemir A. Mechanical and microstructural properties of low-carbon steel-plate-reinforced gray cast iron. *J Mater Process Technol* 2009;209:1410–6.
- [18] American Society for Metals. ASM Handbook. Volume 12, Fractography. American Society for Metals., Metals Park, Ohio, 1987; 1987.
- [19] Aliakbari K, Akbarpour Mamaghani T. Analysis

- Failure Analysis of Ductile Iron Differential Housing Spline in 4WD Passenger Car. *Int J Met* 2021;15:587–601. <https://doi.org/10.1007/s40962-020-00487-2>.
- [28] Fan L, Hu HB, Tang XS, He JJ, Chen W. Influence of Microscopic Effects on the Static Tensile Strength of Gray Cast Iron HT200 Specimens. *Adv Mater Sci Eng* 2021;2021.
- [29] Hejma P, Svoboda M, Kampo J, Soukup J. Analytic analysis of a cam mechanism. *Procedia Eng* 2017;177:3–10.
- [30] Torshizian MR, Aliakbari K, Ghonchehi M.

بررسی تأثیر پارامترهای فرآیندی بر شکل‌دهی با گاز لوله‌ی آلومینیومی AA ۶۰۶۳ در دمای داغ با استفاده از روش سطح پاسخ

مصطفی رجائی^{۱*}، سید جمال حسینی پور^۲، حامد جمشیدی اول^۳

- ۱- استادیار؛ مهندسی مکانیک، دانشکده‌ی فنی، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تهران، ایران.
۲- استادیار؛ مهندسی مواد، دانشکده‌ی مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، ایران.
۳- دانشیار؛ مهندسی مواد، دانشکده‌ی مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، ایران.

چکیده

آلیاژهای آلومینیوم کاربردهای زیاد، خواص ضد خوردگی و نسبت استحکام به وزن مناسبی دارند. فرآیند شکل‌دهی فلز داغ با دمش گاز جزو روش‌های نوین می‌باشد. در این مقاله، جهت به‌دست آوردن بیشترین درصد پرشدگی قالب و حداقل درصد نازک‌شدگی در ناحیه‌ی شکل‌دهی لوله‌های پله‌ای استوانه‌ای آلومینیومی آلیاژ ۶۰۶۳، از یک شیوه‌ی آماری بر پایه‌ی شبیه‌سازی اجزای محدود استفاده شده است. ابتدا مدل دقیق اجزای محدود از فرآیند تهیه گردیده و صحت مدل ایجادشده در قیاس با نتایج قطعه‌ی تجربی تأیید شده است. سپس تحلیل رگرسیون رویه‌ی پاسخ برای برازش یک سطح بر پاسخ‌های به‌دست‌آمده از آزمایشات به کار رفته است. عوامل مؤثر شامل دمای شکل‌دهی، فشار، نرخ فشار، تغذیه‌محوری و سرعت پانچ از روش سطح پاسخ به‌منظور استخراج مدل و یافتن بیشترین تأثیر مورد ارزیابی قرار گرفت. هریک از این فاکتورها در سه سطح در قالب طراحی آزمایشات طرح مرکب مرکزی مورد مطالعه قرار گرفته تا تأثیر پارامترها و بهترین شرایط شناسایی شود. برای مدل‌سازی روش سطح پاسخ، از نرم‌افزار دیزاین اکسپرت و برای شبیه‌سازی از نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس استفاده شده است. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، نقطه‌ی بهینه‌ی به‌دست‌آمده برای هر دو ویژگی مورد مطالعه عبارت است از: درجه‌ی حرارت 552°C ، فشار ۶/۵ bar/s، نرخ فشار ۰/۰۲ bar/s، تغذیه‌محوری ۷ mm و سرعت تغذیه ۰/۰۵ mm/s با درصد پرشدگی ۹۱/۲ و درصد نازک‌شدگی ۱۰/۳۷ به‌دست آمد. مدل ارائه‌شده برای پیش‌بینی مقادیر متغیرهای وابسته نتایج بسیار نزدیکی با یافته‌های تجربی به‌دست‌آمده داشت.

کلمات کلیدی

بهینه‌سازی، شکل‌دهی فلز داغ با گاز، سطح پاسخ، لوله‌های پله‌ای.

Investigating the effect of process parameters on gas forming of AA6063 aluminum tube at hot temperature using response surface method

M. Rajaei^{*1}, S. J. Hosseinipour², H. Jamshidi Aval³

1-Department of Mechanics, Faculty of Neyshabour, Khorasan Razavi Branch, Technical and Vocational University, Neyshabour, Iran

2-Research Center for Advanced Processes of Materials Forming, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

Abstract

Aluminum alloys have many applications, anti-corrosion properties, and good strength-to-weight ratio. The hot metal gas forming process is one of the new methods. In this article, a statistical method based on finite element simulation has been used in order to obtain the highest percentage of mold filling and the lowest percentage of thinning in the forming area of 6063 aluminum alloy cylindrical stepped tubes. First, the detailed model of the finite elements of the process is prepared and the accuracy of the created model is confirmed by comparison with the results of the experimental part. Then the regression analysis of the response procedure has been used to fit a level on the responses obtained from the experiments. Effective factors including forming temperature, pressure, pressure rate, axial feed and punching speed were evaluated from the response surface method in order to extract the model and find the greatest effect. Each of these factors has been studied at three levels in the form of central composite design experiments to identify the effect of parameters and the best conditions. Design Expert software was used for modeling the response surface method and Abaqus finite element software was used for simulation. According to the obtained results, the optimal point obtained for both studied characteristics is: Temperature 552°C , pressure 6.5 bar, pressure rate 0.02 bar/s, axial feed 7 mm and feed speed 0.05 mm/s with filling percentage 91.2 and thinning percentage 10.37 were obtained. The presented model for predicting the values of the dependent variables had very close results with the experimental findings.

Keywords

Optimization, Hot Metal Gas Forming, Response Surface Methodology, AA6063 Alloy Step Tube

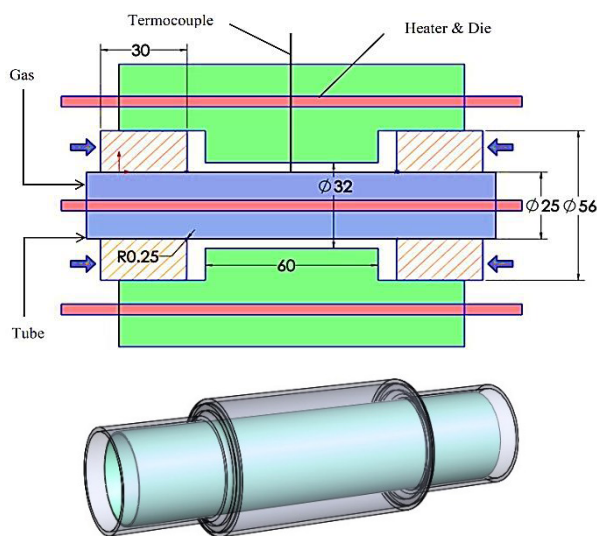
۱- مقدمه

با پیشرفت روزافزون فناوری صنایع نظامی، فضایی و خودروسازی، به‌منظور کاهش مصرف سوخت، کاهش هزینه‌ی تولید، محصولات با کیفیت بالاتر و همچنین تولید قطعات پیچیده، استفاده از مواد سبک‌وزن مانند آلیاژهای آلومینیوم به‌صورت جدی مورد توجه قرار گرفته است. در این راستا، یکی از راهکارهای جدید استفاده از دمش گاز در دمای بسیار بالاست که فرآیند شکل‌دهی فلز داغ با گاز^۱ یا شکل‌دهی با دمش گاز نامیده می‌شود. تنش سیلان فوق‌العاده کم ماده در دمای بالا شکل‌دهی قطعات بزرگ را امکان‌پذیر می‌کند و شکل‌پذیری بالای ماده در دمای بالا که تولید قطعات پیچیده و با عمق زیاد را ممکن می‌سازد، از جمله ویژگی‌های سودمند این فرآیند است [۱].

برخی از تحقیقات انجام‌شده با این فرآیند بر روی لوله در ادامه ذکر می‌شود. کدخداییان و همکارانش [۲] ابتدا با تحلیل آماری بر روی نتایج حاصل از شبیه‌سازی، ارتباط ریاضی بین متغیرهای نیرویی و شاخص‌های شکل‌پذیری را تعیین کردند و سپس با وارد کردن مدل‌های ریاضی حاصل به یک الگوریتم تکاملی، منحنی‌های نیرویی بهینه برای سهرای T را به‌دست آوردند. احمدی و همکارانش [۳] به‌منظور بهینه‌سازی منحنی اعمال بار، از یک شیوه‌ی آماری بر پایه‌ی شبیه‌سازی اجزای محدود کمک گرفتند، ابتدا مدل دقیق اجزای محدود از فرآیند پیاده‌سازی و صحت مدل با قطعه‌ی تجربی تأیید شد. سپس با انجام بهینه‌سازی، نمودار فشار-جابه‌جایی بهینه‌ای را به‌دست آوردند که با اعمال آن، قطعه با کمترین پراکندگی ضخامت تولید گردید. پژوهش‌های دیگری نیز روی بهینه‌سازی پارامترهای فرآیند هیدروفرمینگ لوله‌ی تک‌لایه (مسیر بارگذاری فشار و پیشروی) انجام شده است که می‌توان به الگوریتم ژنتیک [۴ و ۵]، منطق

فازی [۶] اشاره کرد. در این الگوریتم، پارامترهای فشار داخلی و پیشروی محوری بهینه‌سازی شده‌اند و مسیر بارگذاری خطی فرض شده است. رجائی و همکاران [۷] مسیر بارگذاری بهینه را در فرآیند شکل‌دهی لوله‌های پلکانی استوانه‌ای AA۶۰۶۳ با استفاده از پارامترهای فشار داخلی، نرخ فشار، تغذیه‌محوری و سرعت پانچ به‌دست آوردند. لی و همکاران [۸] اثر تغذیه را بر روی تشکیل گاز داغ لوله‌های آلیاژ تیتانیوم کم‌استحکام مورد مطالعه قرار دادند که نشان داد بهترین دما برای شکل‌پذیری بالاتر حدود ۸۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد است. وادیلو و همکاران [۹] از شبیه‌سازی عددی برای مطالعه‌ی اثر منحنی بارگذاری در فرآیند HMGF استفاده کردند. آن‌ها توانستند فولاد ضدزنگ فریتی را تا ۵۵٪ در ۱۰۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد بالچ کنند. وو و همکاران [۱۰] رفتار ورق‌های نوردشده $Ti_{22}Al_{24}, 5Nb, 5Mo$ توسط آزمایش‌های کششی تک‌محوره و برآمدگی داغ با گاز را مطالعه کردند. آن‌ها منحنی حد شکل‌گیری را تحت نرخ کرنش معادل ثابت به‌دست آوردند. مائو و همکاران [۱۱] با اعمال تغذیه‌محوری در فرآیند شکل‌دهی داغ، با دمش هوا تا دمای ۵۶۰ درجه‌ی سانتی‌گراد، شکل‌پذیری لوله‌ی آلیاژ آلومینیم ۶۰۶۳ را به وسیله‌ی آزمون برآمدگی آزاد مطالعه نمودند. نتایج آن‌ها نشان داد که تغذیه‌محوری نقش بسیار مهمی در شکل‌پذیری لوله در حالت داغ نسبت به حالت سرد داشته، به‌طوری که نسبت انبساط با تغذیه‌محوری در حدود ۱۳۲ درصد به‌دست آمد. المو و همکاران [۱۵] یک روش پیش‌فرمینگ با استفاده از یک یا چند موج در سطح مقطع لوله و سپس شکل‌دهی داغ لوله‌های فلزی $22MnB5$ جهت غلبه بر محدودیت‌های تشکیل HMGF را پیشنهاد کرده که به افزایش حداقل ضخامت دیواره‌ی قطعه‌ی کار پس از فرآیند شکل‌دهی

آلومینیوم ۶۰۶۳ به قطر ۲۵ میلی‌متر با ضخامت ۱/۳ میلی‌متر، قالب، کمپرسور هوا، مانومتر، ترموکوپل نوع k، سیستم حرارتی و مجموعه‌ی سیستم تغذیه‌محوری. در این پژوهش، با توجه به شکل‌دهی در دمای بالا، از یک طراحی جدید در مکانیزم و قالب جهت اعمال تغذیه‌محوری استفاده شد. جنس قالب فولاد SPK بوده که با استفاده از دستگاه CNC با دقت بالا ماشین‌کاری شده است.



شکل ۱: الف) شماتیکی از قالب، المنت‌های حرارتی، هندسه‌ی قالب و لوله ب) شماتیکی لوله و قالب در محیط سرهم‌سازی در نرم‌افزار ABAQUS

بررسی روی فرآیند به‌صورت هم‌دما انجام شده و برای رساندن دمای مجموعه به محدوده‌ی 530°C - 580°C ، از پنج عدد گرمکن میله‌ای و دو عدد گرمکن فشنگی با توان هر کدام ۳۰۰ وات و برای کنترل دما، از یک کنترلر درجه‌ی حرارت با دقت $\pm 3^{\circ}\text{C}$ استفاده شده است. در شکل (۱-الف)، شماتیکی از مجموعه قالب با یک طراحی جدید و هندسه‌ی مشخص، هندسه‌ی لوله، گرمکن‌ها و بوش‌ها نشان داده شده است. در شکل (۱-ب)، شماتیکی از لوله و قالب نشان داده شده که لوله در حالت پرشدگی کامل

به بیش از ۴۰٪ و کاهش احتمال تشکیل ترک کمک می‌کند. فضائی و همکاران [۱۶] اثر نرخ افزایش فشار گاز بر نحوه‌ی شکل‌گیری لوله‌ی تیتانیوم در دمای 840°C با استفاده از المان محدود و تست تجربی مورد مطالعه قرار دادند. نتایج حاصل از آزمایشات مختلف نشان داد که کاهش نرخ افزایش فشار گاز درون لوله، ضمن فراهم‌آوردن فرصت لازم برای یک‌نواختی دما و در نتیجه شکل‌گیری یک‌نواخت قطعه، باعث کاهش نرخ کرنش در جداره‌ی لوله شده و بدین ترتیب احتمال پاره‌شدن لوله کاهش می‌یابد.

۲- بیان مسئله، نوآوری و ذکر اهداف

در این مقاله، به تعیین بهینه‌ی پارامترهای دمای شکل‌دهی، فشار، نرخ فشار، تغذیه‌محوری و سرعت پانچ بر شکل‌پذیری لوله‌های پله‌ای در فرآیند شکل‌دهی داغ با دمش گاز به‌منظور ایجاد پرشدگی مناسب قالب و به‌حداقل‌رساندن بیشترین نازک‌شدگی لوله پرداخته شده که از روش سطح پاسخ به‌منظور استخراج مدل و یافتن بیشترین تأثیر عوامل استفاده شده است. هریک از این فاکتورها در سه سطح در قالب طرح آزمایشات طرح مرکب مرکزی^۱ مورد مطالعه قرار گرفته تا تأثیر پارامترها و بهترین شرایط برای بیشترین پرشدگی قالب و به‌حداقل‌رساندن بیشترین نازک‌شدگی لوله شناسایی شود.

۳- روش تحقیق

۳-۱- آزمون‌های تجربی

تجهیزات مورد استفاده در فرآیند شکل‌دهی داغ لوله با دمش گاز همراه با تغذیه‌محوری عبارتند از: لوله‌ی آلیاژ

دماهای ۵۳۰، ۵۵۰ و ۵۸۰ درجه‌ی سانتی‌گراد انجام شد. آنالیز ترکیب شیمیایی لوله‌ی آلیاژ آلومینیم ۶۰۶۳ به روش کوانتومتری انجام و در جدول ۱ گزارش شده است.

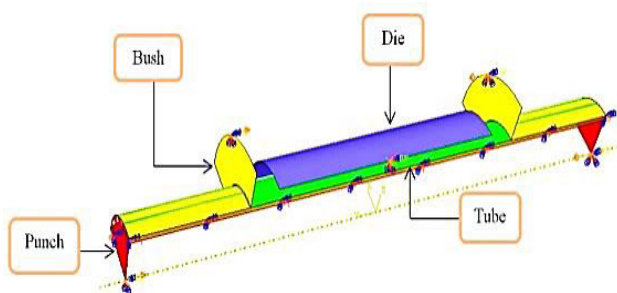
جدول ۱: ترکیب شیمیایی لوله (wt%)

AL	Mg	Si	Fe	Zn	Cu	Mn	Pb	Ti	Sn	Ni
(wt%)	0.482	0.335	0.0208	0.01	0.0166	0.03	0.03	0.03	0.017	0.02

برای تولید قطعات، از مسیر بارگذاری و درجه‌ی حرارت شکل‌دهی که پس از بهینه‌سازی عوامل مؤثر بر فرآیند شکل‌پذیری توسط نرم‌افزار دیزاین اکسپرت پیشنهاد شده، استفاده گردیده است.

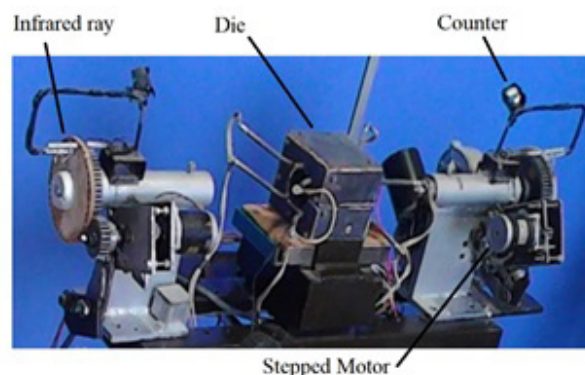
۳-۲- شبیه‌سازی اجزای محدود

به‌دلیل تغییر شکل متقارن لوله، از مدل متقارن محوری سه‌بعدی جهت شبیه‌سازی فرآیند استفاده گردید. نوع المان‌ها C3D4R و تعداد ۳ المان در راستای ضخامت لوله و ابعاد المان‌ها $1 \times 1 \times 0.43 \text{ mm}^3$ می‌باشد. قالب نیز با المان خطی و چهارگوش R3D4، از سری المان‌های صلب^۱ مش‌بندی شده و از حل‌گر ضمنی^۲ برای تحلیل شبیه‌سازی استفاده گردید.



شکل ۳: شماتیکی از مدل به‌کاررفته در شبیه‌سازی

به شکل داخلی قالب درآورده می‌شود. به‌منظور ایجاد تغذیه‌محوری لازم در آزمایش‌ها، یک مجموعه دستگاه که قابلیت اتصال به کامپیوتر را دارد و می‌تواند از دو طرف تغذیه‌محوری را با دقت زیاد اعمال کند، طراحی و ساخته شد. به‌منظور تأمین فشار شکل‌دهی، از یک دستگاه کمپرسور با حداکثر ظرفیت ایجاد فشار ۱۰ بار استفاده گردید. میزان سرعت و مقدار پیشروی توسط برد کنترل‌کننده‌ی استپ موتور تنظیم و با استفاده از پمپ، فشار به‌صورت خطی و آرام اعمال تا به فشار نهایی برسد، کنترل فشار در حین انجام فرآیند به وسیله‌ی مانومتر با دقت $\pm 0.3 \text{ bar}$ انجام می‌گیرد. برای آب‌بندی لوله، در دو انتهای آن، از دو سیستم ثابت‌کننده پیچ‌ومهره‌ای توسط بوش فلزی استفاده شده است که مانع از نشت هوای فشرده از لوله می‌شود. از اشعه‌ی مادون قرمز برای اندازه‌گیری دقیق میزان پیشروی تغذیه‌محوری استفاده می‌شود. در شکل ۲، شماتیکی از مجموعه دستگاه با یک طراحی جدید نشان داده شده است.



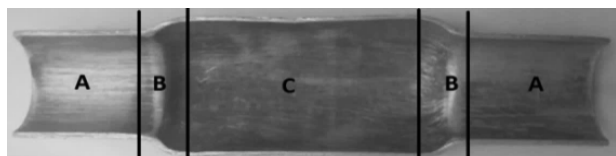
شکل ۲: شماتیکی از مجموعه تجهیزات سیستم تغذیه‌محوری

در ادامه، برای بررسی اثر دما و فشار شکل‌دهی بر روی حداقل درصد نازک‌شدگی و پرشدگی قالب، فرآیند شکل‌دهی داغ با دمش گاز همراه با تغذیه‌محوری در

۱- Discrete Rigid

۲- Implicit

نمونه‌ها در راستای طولی لوله به وسیله‌ی دستگاه برش سیمی بریده شده و همان‌طور که در شکل ۶ نشان داده شده است، ضخامت نمونه در قسمت‌های مختلف با استفاده از میکرومتر اندازه‌گیری شد. همچنین پروفیل قطعه و درصد پرشدگی قالب مورد بررسی قرار گرفته است.

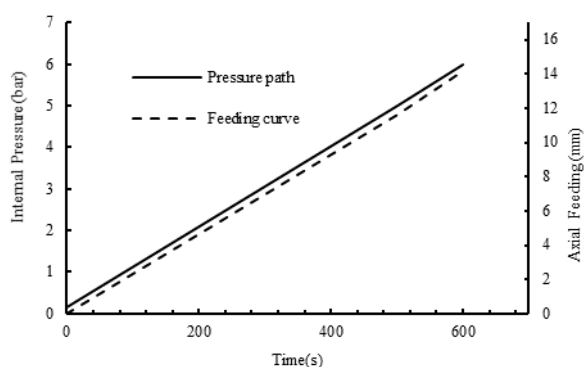


شکل ۶: نمونه برش خورده

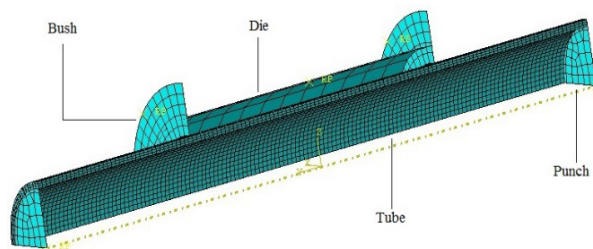
۴- نتایج و بحث

۴-۱- صحت‌سنجی شبیه‌سازی

برای تأیید شبیه‌سازی اجزای محدود، توزیع ضخامت از مرکز لوله پر شده و درصد پرشدگی با استفاده از مسیر بارگذاری شکل ۷ در دمای ۵۸۰ درجه‌ی سانتی‌گراد حاصل از شبیه‌سازی با نتایج تجربی مقایسه شد.

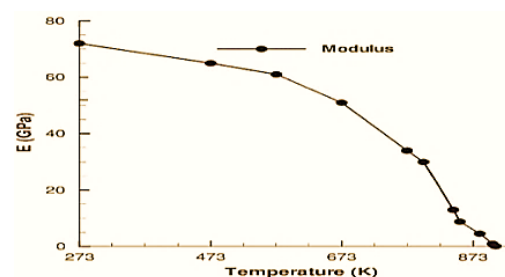


شکل ۷: مثالی از نمودار مسیر فشار و تغذیه‌محوری برحسب زمان برای فشار ۶ بار با تغذیه‌محوری ۱۴ میلی‌متر



شکل ۴: المان‌بندی مجموعه در نرم‌افزار اجزای محدود

در قسمت تعیین مشخصات سطوح در تماس باهم، از مدل اصطکاکی کولمب^۱ با ضریب اصطکاک ۰/۵ [۱۳] برای سطوحی که لوله با اجزا در تماس است، استفاده شده است. روش انتخاب سطوح روش تماس سطح‌به‌سطح^۲ و روش حل مدل اصطکاکی از نوع پنالتی^۳ انتخاب شده است. المان‌ها به‌صورت سعی و خطا به اندازه‌ای در نظر گرفته شده که کوچک‌شدن بیشتر آن تأثیر قابل‌ملاحظه‌ای در دقت نتایج نداشته باشد. در شکل ۴، مدل المان‌بندی مجموعه نشان داده شده است. در شکل ۵ و جدول (۲)، خواص مکانیکی آلیاژ مذکور که در شبیه‌سازی مورد استفاده قرار گرفت، ارائه شده است.



شکل ۵: نمودار تغییرات مدول الاستیک آلیاژ آلومینیوم برحسب دما [۱۷]

جدول ۲: خواص مکانیکی ماده‌ی لوله AA ۶۰۶۳ [۱۴-۱۳]

Material properties	Amount
Poissons ratio	۰/۳۳
Density (kg/m ^۳)	۲۶۸۰
Friction Coefficient	۰/۵

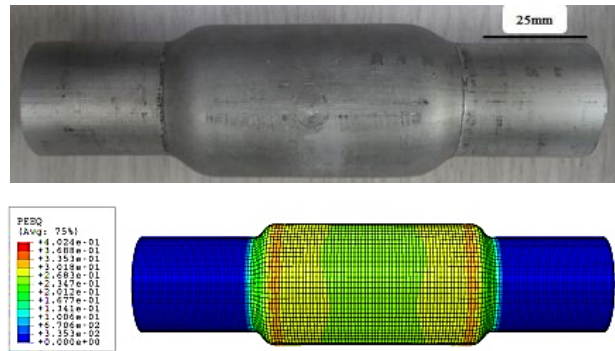
۱- Coulomb

۲- Surface to surface

۳- Penalty

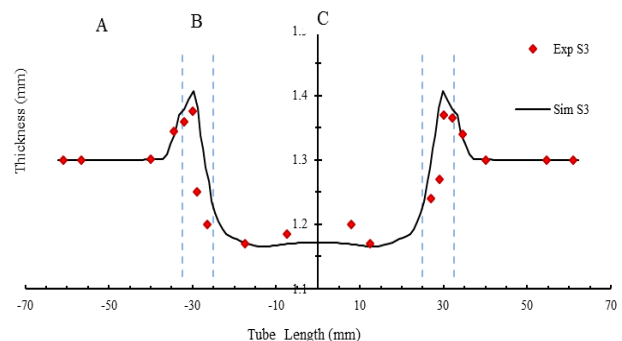
۸۷	شبیه‌سازی
۴	درصد خطا (%)

در شکل ۸، لوله‌ی پله‌ای استوانه‌ای شکل داده‌شده در آزمایش تجربی و شبیه‌سازی برای لوله با قطر ۲۵ و ضخامت ۱/۳ میلی‌متر و قطر قالب ۳۲ mm نشان داده شده است.



شکل ۸: لوله‌ی پله‌ای استوانه‌ای شکل داده‌شده در آزمایش تجربی و شبیه‌سازی در دمای 580°C

در شکل ۹، نمودار توزیع ضخامت نمونه‌ی شکل داده‌شده در شبیه‌سازی و تجربی با یکدیگر مقایسه شده است. همان‌طور که در جدول ۳ نشان داده شده است، تفاوت بین درصد پرشدگی آزمایش و عددی کمتر از ۵٪ است.



شکل ۹: نمودار توزیع ضخامت در شبیه‌سازی و تجربی در دمای 580°C

جدول ۳- مقایسه‌ی تجربی و شبیه‌سازی درصد پرشدگی در دمای 580°C درجه‌ی سانتی‌گراد

درصد پرشدگی	آزمایش
۹۱	

۲-۴- بهینه‌سازی با روش سطح پاسخ

هر مسئله‌ی بهینه‌سازی نیازمند تعریف یک تابع هدف^۱ است که برطبق نیاز می‌بایست حداقل (یا بیشینه) شود؛ این کار با تغییر در متغیرهای طراحی^۲ امکان‌پذیر است. در این تحقیق، عوامل بهینه پنج عامل دمای شکل‌دهی، فشار، نرخ فشار، تغذیه‌محوری و سرعت پانچ از روش سطح پاسخ می‌بایست تعیین شود که اهداف مورد نظر شکل‌دهی، یعنی کمترین درصد نازک‌شدگی و بیشترین درصد پرشدگی قالب را برآورده سازد.

روش مورد استفاده در این تحقیق مدل‌سازی روش سطح پاسخ می‌باشد که ازجمله روش‌های آماری است؛ این روش مجموعه‌ای متشکل از تکنیک‌های ریاضی و استنتاج آماری است که برای مدل‌سازی و تحلیل مسائلی به‌کار می‌رود که در آن‌ها خروجی سیستم (پاسخ) از تعداد زیادی از متغیرها تأثیر می‌پذیرد و هدف، بهینه‌سازی پاسخ‌های به‌دست آمده می‌باشد.

۳-۴- طراحی آزمایش

مهم‌ترین مسئله‌ی این تحقیق بررسی آثار اصلی و متقابل فاکتورها بوده که ازاین‌رو طرح آماری سطح پاسخ انتخاب شد. در این پژوهش، مدل‌سازی برای انجام آزمایش‌های معرفی‌شده از روش سطح پاسخ، با استفاده از نرم‌افزار شبیه‌سازی اجزای محدود (Abaqus) انجام گرفت و سپس از روش RSM-FEA برای به‌دست آوردن اطلاعات مورد نیاز

۱- Objective Function

۲- Design Variables

یک مقدار خیلی کوچک فرض می‌شود؛ زیرا در صورت صفر فرض شدن، در جدول ۵ آزمایش‌های شماره ۱ تا ۹ و ۱۷ تا ۲۵ به علت تغذیه‌ی صفر، عملاً سرعت پانچ نیز صفر شده و دقیقاً این دو دسته آزمایش شبیه هم می‌شوند که با توجه به تعیین ۴۳ آزمایش توسط نرم‌افزار جهت بهینه‌سازی، دقت پایین می‌آید. (عدد ۰/۲ در تغذیه‌محوری برای از بین بردن خطای آماری می‌باشد و دراصل نماینده‌ی عدد صفر می‌باشد).

۴-۴-ارائه‌ی نتایج و بحث

طبق طرح آماری، با استفاده از نرم‌افزار آباکوس، شبیه‌سازی آن‌ها انجام شد و درصد پرشدگی قالب و حداقل درصد نازک‌شدگی آن‌ها به دست آمد که نتایج حاصل از آن در جدول ۵ آمده است.

جدول ۵: ماتریس طراحی آزمایشات

NO	T	P	$\dot{P}$	X	V	Filling (%) Die	Thinning percentage (%)
۱		۵	۰,۰۱	۰,۲		۴,۶۰	۲,۳۰
۲		۵	۰,۰۱	۰,۲		۱۸,۷۵	۹,۲۷
۳		۹	۰,۰۱	۰,۲		۱۹,۷۱	۹,۷۰
۴		۹	۰,۰۱	۰,۲		۲۹,۴۶	۱۱,۶۷
۵		۵	۰,۰۵	۰,۲		۰,۰۹	۲,۰۳
۶		۵	۰,۰۵	۰,۲		۶,۳۵	۱,۹۸
۷		۹	۰,۰۵	۰,۲		۸,۹۷	۶,۰۹
۸		۹	۰,۰۵	۰,۲		۲۳,۸۷	۴,۳۴
۹		۵	۰,۰۱			۷۳,۸۰	۵,۷۴
۱۰		۵	۰,۰۱			۸۶,۶۷	۱۰,۳۲
۱۱		۹	۰,۰۱			۸۰,۴۹	۵,۹۸
۱۲		۹	۰,۰۱			۸۷,۳۷	۱۰,۴۸
۱۳		۵	۰,۰۵			۶۳,۸۳	۸,۳۹

با توجه به طرح DOE استفاده گردید. در این مطالعه، اثر متغیرهای مستقل شامل: دمای شکل‌دهی (T)، فشار (P)، نرخ فشار ($\dot{P}$)، تغذیه‌محوری (X) و سرعت سنبه (V) در سه سطح مورد ارزیابی قرار گرفت. در جدول ۴، متغیرهای مستقل فرآیند و مقادیر آن‌ها نشان داده شده است. در این تحقیق، از طرح مرکب مرکزی (CCD) با پنج متغیر مستقل شامل دمای شکل‌دهی، فشار، نرخ فشار، تغذیه‌محوری و سرعت پانچ، در سه سطح، جهت بررسی تأثیر شرایط بر پاسخ‌ها (درصد پرشدگی قالب و بیشترین نازک‌شدگی در لوله را به حداقل مقدار ممکن رساند) و بهینه‌سازی فرآیندهای مذکور استفاده شد؛ زیرا از این روش (CCD) برای تعیین مدل استاتیکی فرآیند و ارزیابی اثر متقابل بین فاکتورهای مؤثر بر هدف و همچنین شناسایی مؤثرترین عامل بر تابع هدف فرایند بهره گرفته می‌شود.

جدول ۴: متغیرهای مورد بررسی در بهینه‌سازی و مقدار سطوح آن‌ها

نماد	سطح (-۱)	سطح (۰)	سطح (+۱)
دما ($^{\circ}\text{C}$)	T	۵۳۰	۵۵۰
فشار (Bar)	P	۵	۷
نرخ فشار (Bar/s)	$\dot{P}$	۰/۰۰۱	۰/۰۰۳
تغذیه‌محوری (mm)	X	۰/۰۲	۷
سرعت سنبه (mm/s)	V	۰/۰۱	۰/۰۳

طرح اولیه‌ی آزمایش‌ها به کمک نرم‌افزار Design & Expert طراحی و استفاده شد (جدول ۵). در جدول ۴، کمترین مقدار تغذیه‌محوری ۰/۲ میلی‌متر در نظر گرفته شده که این مقدار دراصل صفر بوده، ولی در محاسبات برای جلوگیری از خطای ناشی از عدد صفر،

۳۰	۵	۰,۰۵		۸۲,۰۷	۶,۹۸	۱۴	۵	۰,۰۵	۴۰,۰۲	۷,۸۳
۳۱	۹	۰,۰۵		۷۹,۸۰	۵,۶۳	۱۵	۹	۰,۰۵	۳۸,۳۷	۶,۳۵
۳۲	۹	۰,۰۵		۸۴,۸۱	۷,۹۱	۱۶	۹	۰,۰۵	۲۷,۷۳	۴,۹۹
۳۳	۷	۰,۰۳	۷,۱	۳۰,۵۸	۰,۱۱	۱۷	۵	۰,۰۱	۰,۶۰	۰,۷۳
۳۴	۷	۰,۰۳	۷,۱	۴۱,۶۰	۳,۷۶	۱۸	۵	۰,۰۱	۱۸,۹۰	۹,۴۵
۳۵	۵	۰,۰۳	۷,۱	۳۲,۹۸	۴,۳۲	۱۹	۹	۰,۰۱	۱۹,۹۹	۸,۶۳
۳۶	۹	۰,۰۳	۷,۱	۷۹,۲۸	۸,۴۶	۲۰	۹	۰,۰۱	۲۹,۲۰	۱۱,۶۲
۳۷	۷	۰,۰۱	۷,۱	۷۳,۵۸	۱۴,۲۱	۲۱	۵	۰,۰۵	۰,۰۸	۰,۰۳
۳۸	۷	۰,۰۵	۷,۱	۶۹,۲۷	۱۲,۲۶	۲۲	۵	۰,۰۵	۶,۲۷	۲,۲۳
۳۹	۷	۰,۰۳	۰,۲	۱۵,۸۲	۷,۸۲	۲۳	۹	۰,۰۵	۹,۱۰	۴,۱۷
۴۰	۷	۰,۰۳		۸۱,۹۸	۶,۴۴	۲۴	۹	۰,۰۵	۲۱,۶۵	۳,۸۲
۴۱	۷	۰,۰۳	۷,۱	۸۲,۸۴	۱۴,۵۸	۲۵	۵	۰,۰۱	۲۸,۶۳	۰,۰۱
۴۲	۷	۰,۰۳	۷,۱	۷۳,۰۴	۱۳,۰۴	۲۶	۵	۰,۰۱	۶۹,۱۸	۷,۱۱
۴۳	۷	۰,۰۳	۷,۱	۷۱,۳۲	۱۰,۶۰	۲۷	۹	۰,۰۱	۵۲,۱۲	۲,۹۸
						۲۸	۹	۰,۰۱	۸۳,۱۵	۹,۹۵
						۲۹	۵	۰,۰۵	۵۰,۰۲	۲,۷۵

۴-۵- تجزیه و تحلیل آماری

در جدول‌های ۶ و ۷، نتایج حاصل از آنالیز آماری به‌ترتیب برای پاسخ درصد پرشدگی قالب و پاسخ درصد نازک‌شدگی بر اساس مدل‌های مختلف ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در هر دو پاسخ از میان مدل‌های مختلف، نرم‌افزار معادله‌ی درجه‌دوم را به عنوان مناسب‌ترین مدل برای برازش داده‌ها پیشنهاد نموده است.

جدول ۶: نتایج تحلیل آماری مربوط به درصد پرشدگی قالب

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F	
Mean vs Total	۱۵۸۹,۴۸	۱	۱۵۸۹,۴۸			
Linear vs Mean	۲۲۱,۶۳	۵	۴۴,۳۳	۱۸,۸۹	$0.0001 >$	
۲FI vs Linear	۲۷,۷	۱۰	۲,۷۷	۱,۲۷	۰,۲۹۷۵	
۲FI Quadratic vs	۴۲,۸۸	۵	۸,۵۸	۱۱,۶۲	$0.0001 >$	Suggested
Cubic vs Quadratic	۱۴,۶۶	۱۵	۰,۹۸	۴,۳۵	۰,۰۲۸۶	Aliased
Residual	۱,۵۷	۷	۰,۲۲			
Total	۱۸۹۷,۹۳	۴۳	۴۴,۱۴			

جدول ۷: نتایج تحلیل آماری مربوط به درصد نازک‌شدگی

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F	
Mean vs Total	۱۹۱۵,۷۹	۱	۱۹۱۵,۷۹			
Linear vs Mean	۲۰۷,۰۱	۵	۴۱,۴	۳,۴۵	۰,۰۱۱۷	
۲FI vs Linear	۱۵۴,۷	۱۰	۱۵,۴۷	۱,۴۴	۰,۲۱۴۷	
۲FI Quadratic vs	۲۶۲,۳۱	۵	۵۲,۴۶	۴۲,۷۹	۰,۰۰۰۱ >	Suggested
Cubic vs Quadratic	۲۱,۷۴	۱۵	۱,۴۵	۱,۹۴	۰,۱۹۱۲	Aliased
Residual	۵,۲۴	۷	۰,۷۵			
Total	۲۵۶۶,۷۹	۴۳	۵۹,۶۹			

معنادار است. از میان پنج اثر درجه دوم متغیرها، دو اثر شامل اثرات درجه دوم دما (T^2) و درجه دوم تغذیه محوری (X^2) معنادار می‌باشد. همچنین از میان ده اثر متقابل بین متغیرها، سه اثر شامل اثرات متقابل دما با تغذیه محوری ($T \times X$)، فشار با تغذیه محوری ($P \times X$) و اثر متقابل نرخ فشار با سرعت سنبه ($V \times \dot{P}$) بر درصد پرشدگی قالب معنادار می‌باشد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با توجه به ضریب رگرسیون تحلیل واریانس ارائه شده میزان تاثیر تغذیه محوری (X) مهم‌ترین و تأثیرگذارترین پارامتر برای پرشدگی قالب است. بعد از آن، به ترتیب فشار (P) و دما (T) تأثیرگذار می‌باشد. نتایج حاصل نشان می‌دهد که مدل درجه دوم برازش شده با ضریب اطمینان بیش از ۹۳ درصد ($R^2 > 93$) با داده‌های آزمایش مطابقت دارد.

پس از انتخاب معادله‌ی درجه دوم به عنوان مدل مناسب، تحلیل واریانس ANOVA انجام شد. جهت اطمینان در مورد صحت عبارت‌های موجود در مدل، از مقدار p-value استفاده می‌شود. هرچه مقدار p-value (میزان معنی‌داری) کوچکتر باشد، مدل پیشنهادی مقادیر پاسخ را بهتر برازش کرده است. در صورتی که دو عبارت دارای میزان معنی‌داری یکسانی باشند، عبارتی از اهمیت بیشتری برخوردار است که دارای F-value (آماره‌ی آزمون) بالاتری باشد. عبارت‌هایی که مقدار P آن‌ها از ۰/۰۵ کمتر باشد، از لحاظ آماری می‌تواند داده‌ها را با خطای کمتر از ۵ درصد پیش‌بینی کند.

در جدول ۸، نتایج تحلیل واریانس ANOVA برای درصد پرشدگی قالب نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که از میان پنج اثر خطی، چهار اثر بر درصد پرشدگی قالب

جدول ۸: جدول ANOVA برای پرکردن قالب.

	عدد P	ضریب	میانگین	درجه‌ی	مجموع	
	(میزان معنی داری)	رگرسیون	مربعات	آزادی	مربعات	
Model	> ۰,۰۰۰۱	۳۰,۰۲	۲۲,۰۹	۱۳	۲۸۷,۲۲	significant
T	۰,۰۰۰۱	۱۹,۶۹	۱۴,۴۸	۱	۱۴,۴۸	
P	> ۰,۰۰۰۱	۲۲,۰۵	۱۶,۲۲	۱	۱۶,۲۲	
P̂	۰,۰۰۲۴	۱۱,۰۱	۸,۱	۱	۸,۱۰	
X	> ۰,۰۰۰۱	۲۴۸,۵۴	۱۸۲,۲۲	۱	۱۸۲,۲۲	
V	۰,۹۷۸۴	۴-۷,۹E	۴-۵,۵E	۱	۴-۵,۵E	
X	۰,۰۴۸۲	۴,۲۵	۳,۱۳	۱	۳,۱۳	
T V	۰,۰۵۴۸	۴	۲,۹۵	۱	۲,۹۵	
P X	۰,۰۰۲۸	۱۰,۶۵	۷,۸۴	۱	۷,۸۴	
P V	۰,۰۹۷۸	۲,۹۳	۲,۱۵	۱	۲,۱۵	
V P̂	۰,۰۰۲۹	۱۰,۶۲	۷,۸۱	۱	۷,۸۱	
T²	۰,۰۰۰۸	۱۴,۰۷	۱۰,۳۵	۱	۱۰,۳۵	
X²	۰,۰۱۰۹	۷,۳۹	۵,۴۴	۱	۵,۴۴	
V²	۰,۰۸۰۱	۳,۲۹	۲,۴۲	۱	۲,۴۲	
Residual			۰,۷۴	۲۹	۲۱,۳۳	
Cor Total		$R^2 = ۰.۸/۹۳ = ۰.۸۶۱۰$		۴۲	۳۰۸,۴۵	

جدول ۹: نتایج آنالیز واریانس ANOVA برای درصد نازک‌شدگی

	عدد P	ضریب	میانگین	درجه‌ی	مجموع	
	(میزان معنی‌داری)	رگرسیون	مربعات	آزادی	مربعات	
Model	> ۰/۰۰۰۱	۲۷/۴۸	۳۶/۳۵	۱۷	۶۱۷/۹۳	significant
T	> ۰/۰۰۰۱	۶۰/۴۴	۷۹/۹۵	۱	۷۹/۹۵	
P	> ۰/۰۰۰۱	۳۷/۹۸	۵۰/۲۴	۱	۵۰/۲۴	
P̂	> ۰/۰۰۰۱	۳۹/۸۴	۵۲/۷۰	۱	۵۲/۷۰	
X	۰/۰۴۷۹	۴/۳۳	۵/۷۳	۱	۵/۷۳	
V	۰/۰۰۱۰	۱۳/۹۰	۱۸/۳۹	۱	۱۸/۳۹	
TP	۰/۰۱۰۷	۷/۶۲	۱۰/۰۸	۱	۱۰/۰۸	
T P̂	> ۰/۰۰۰۱	۳۶/۲۷	۴۷/۹۸	۱	۴۷/۹۸	
TV	۰/۰۰۵۳	۹/۳۲	۱۲/۳۲	۱	۱۲/۳۲	
P P̂	۰/۰۲۹۱	۵/۳۶	۷/۰۹	۱	۷/۰۹	
PX	۰/۰۰۰۴	۱۷/۰۶	۲۲/۵۷	۱	۲۲/۵۷	

PV	۵/۸۷	۱	۵/۸۷	۴/۴۴	۰/۰۴۵۴
$\dot{P} X$	۴۲/۷۰	۱	۴۲/۷۰	۳۲/۲۸	۰/۰۰۰۱ >
T $\dot{V}$	۱۲۸/۶۰	۱	۱۲۸/۶۰	۹۷/۲۲	۰/۰۰۰۱ >
P $\dot{V}$	۱۸/۹۷	۱	۱۸/۹۷	۱۴/۳۴	۰,۰۰۰۹
$\dot{V} \dot{P}$	۴۰/۶۱	۱	۴۰/۶۱	۳۰/۷۰	۰/۰۰۰۱ >
X $\dot{V}$	۱۰/۲۶	۱	۱۰/۲۶	۷/۷۶	۰/۰۱
V $\dot{V}$	۵۲/۷۷	۱	۵۲/۷۷	۳۹/۸۹	۰/۰۰۰۱ >
Residual	۳۳/۰۷	۲۵	۱/۳۲		
Cor Total	۶۵۱/۰۰	۴۲			

% ۹۴/۹۴ = R²

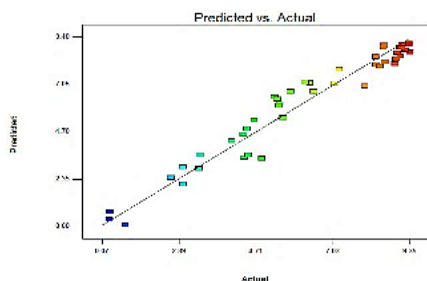
% ۴۷/۹۱ = (adj)R²

$$(\% \text{Die Filling})^{**} = \{ - ۹۴۷,۸۹۰۹۲ + ۳,۴۱۳۷۲T + ۰,۴۰۵۳P - ۶۱,۴۶۱۶۹ \dot{P} + ۴,۰۱۲۱۲ X - ۵۵۷,۵۴۹۵ V \} + \{ - (۳,۶۲۵۲۹E-۳) T \cdot X + ۰,۰۶۰۶۷۴ T \cdot V - ۰,۰۷۱۷۱۶ P \cdot X + ۶,۴۸۴۹۵ P \cdot V + ۱۲۳۵,۲۴۴۵۸ \dot{P} \cdot V \} + \{ (-۳,۰۵۶۷۱ E-۳) T^2 - ۰,۱۱۶۳۳ X^2 + ۲۳۰۹,۲۷۱۱۷ V^2 \}$$

$$\% \text{Thinning} = \{ - ۳۶۷۴,۸۵۶۶۶ + ۱۳,۰۲۸۸۶T + ۱۷,۰۲۷۹۳P + ۷۰۹,۹۴۵۴۱ \dot{P} + ۱,۶۸۸۳X - ۱۴۹۵,۹۵۹۷۱V \} + \{ - ۰,۰۱۱۲۴E-۳ T \cdot P - ۲,۴۴۹۰۹T \cdot \dot{P} + ۱,۲۴۱۲T \cdot V - ۱۱,۷۶۶۲۵P \cdot \dot{P} - ۰,۱۲۱۷۱P \cdot X + ۰,۷۰۶۱۶P \cdot V + ۱۶,۷۴۰۸۹ \dot{P} \cdot X \} + \{ - ۰,۰۱۱۵۷۹T^2 - ۰,۶۹۴۸ P^2 + ۱۰۱۶۶,۳۵۲۸۴ \dot{P}^2 - ۰,۱۷۱۷۸ X^2 + ۱۱۵۸۹,۶۰۲۸۴ V^2 \}$$

جهت مشخص شدن کفایت مدل درصد پرشدگی قالب و مدل درصد نازک‌شدگی، از نمودارهای تأییدکننده استفاده شده که هر دو مدل تأیید گردید. در شکل ۱۰، نمودارهای مربوط به کفایت مدل درصد پرشدگی قالب و بیشترین نازک‌شدگی در قطعه را به حداقل مقدار ممکن رساند، عملکرد خوب مدل را نشان می‌دهد. در این نمودارها، مقادیر پیش‌بینی شده برحسب مقادیر واقعی رسم شده است.

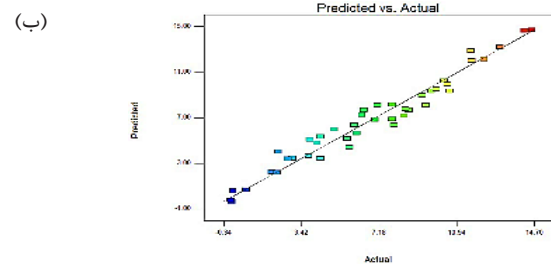
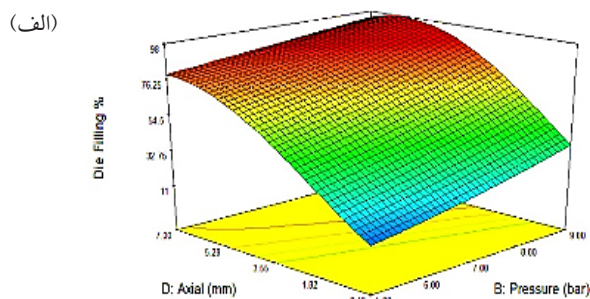
(الف)



نتایج تحلیل واریانس ANOVA برای درصد نازک‌شدگی لوله در جدول ۹ نشان می‌دهد که تمام پنج اثر خطی و درجه دوم متغیرها بر درصد نازک‌شدگی لوله معنادار است. از میان ده اثر متقابل بین متغیرها، هفت اثر شامل اثرات متقابل دما با فشار (T P)، دما با نرخ فشار (T $\dot{P}$)، دما با سرعت سنبه (T V)، فشار با نرخ فشار (P $\dot{P}$)، فشار با تغذیه محوری (P X)، فشار با سرعت سنبه (P V) و اثر متقابل نرخ فشار با سرعت سنبه ($\dot{P} X$) بر درصد نازک‌شدگی لوله معنادار می‌باشد. اثر پارامترهای دما، نرخ فشار و مقدار فشار گاز تأثیر بیشتری بر پاسخ درصد نازک‌شدگی دارند. با توجه به میزان F-value در تحلیل واریانس ارائه شده، دما مهم‌ترین و تأثیرگذارترین پارامتر برای درصد نازک‌شدگی است. نتایج حاصل نشان می‌دهد که مدل درجه دوم برازش شده با ضریب اطمینان بیش از ۹۴ درصد ($R^2 > ۹۴$) با داده‌های آزمایش مطابقت دارد.

۴-۶- ساخت مدل

پس از تحلیل آماری داده‌های شبیه‌سازی، مدل‌های ریاضی زیر به ترتیب برای پیش‌بینی درصد پرشدگی قالب و درصد نازک‌شدگی لوله به دست آمده است.



شکل ۱۰: مقادیر پیش‌بینی‌شده‌ی مدل رگرسیون بر اساس مقادیر واقعی برای (الف) درصد پرشدن قالب و (ب) درصد نازک‌شدن لوله

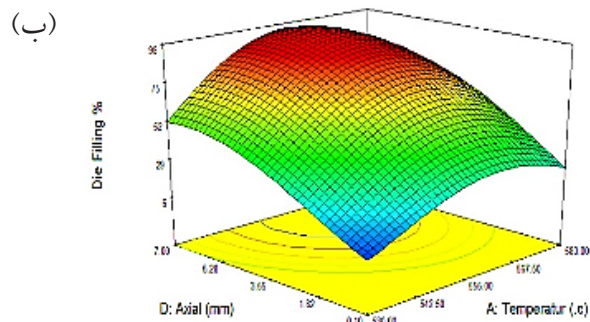
۵- نتایج و بحث

۵-۱- بررسی تأثیر متقابل پارامترها بر درصد پرشدگی قالب

در شکل ۱۱، اثر متقابل فشار و دما با تغذیه‌محوری بر درصد پرشدگی قالب نشان داده شده است. به‌طور کلی با افزایش دما، فشار و تغذیه‌محوری، درصد پرشدگی افزایش می‌یابد که با نتایج حاصل از آزمایشات تجربی تطابق دارد.

در شکل (۱۱-الف) مشاهده می‌شود که با افزایش فشار، اثر تغذیه‌محوری بر درصد پرشدگی بیشتر می‌شود؛ لذا با افزایش فشار چروکیدگی از بین رفته و درصد پرشدگی افزایش می‌یابد.

در شکل (۱۱-ب) مشاهده می‌شود که در تغذیه‌محوری کم، با افزایش دما از ۵۳۰ تا ۵۵۰ درجه‌ی سانتی‌گراد، مقدار درصد پرشدگی افزایش یافته است، اما از دمای ۵۵۰ درجه تا دمای ۵۸۰ درجه‌ی سانتی‌گراد، درصد پرشدگی تغییر قابل‌توجهی نمی‌کند. این روند با افزایش تغذیه‌محوری نیز ادامه دارد. از یک طرف، با افزایش دما، استحکام ماده کاهش یافته و مقدار تغییر شکل لوله افزایش می‌یابد، از طرف دیگر، با افزایش دما، احتمال چسبندگی لوله به جداره‌ی قالب افزایش یافته و جریان ماده به درون حفره‌ی قالب سخت‌تر می‌شود.



شکل ۱۱: (الف) تأثیر فشار و (ب) دما بر درصد پرشدگی قالب با افزایش تغذیه‌محوری

در شکل ۱۲، اثر متقابل سرعت سنبه با دما، فشار و نرخ فشار بر درصد پرشدگی قالب نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در شکل (۱۲-الف)، سطح پاسخ به‌صورت دوانحنایی یا زین‌اسبی است که نشان‌دهنده‌ی اثر متضاد سرعت سنبه و دما می‌باشد. علت این پدیده می‌تواند ناشی از این باشد که از یک طرف با افزایش سرعت سنبه، سرعت تغییر شکل یا نرخ کرنش افزایش یافته که منجر به افزایش استحکام ماده می‌شود و از طرف دیگر، با افزایش دما استحکام ماده کاهش می‌یابد.

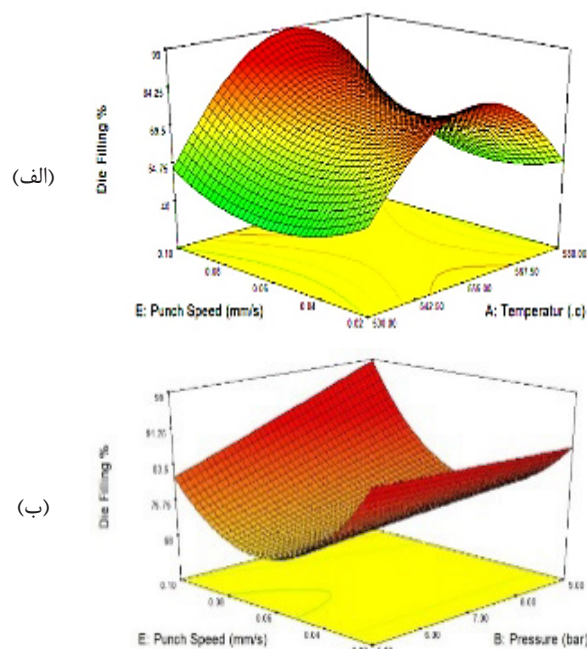
در شکل (۱۲-ب) مشاهده می‌شود که در سرعت سنبه‌ی کم، افزایش فشار تأثیر قابل‌توجهی در درصد پرشدگی ندارد، اما در سرعت سنبه‌ی بالا، افزایش فشار منجر به افزایش شدید درصد پرشدگی می‌شود. دلیل این رفتار ناشی از این است که در سرعت سنبه‌ی کم، افزایش فشار منجر به پارگی یا ترکیدگی لوله شده و لذا درصد پرشدگی تغییر نمی‌کند، اما با افزایش سرعت سنبه یا به عبارت دیگر تغذیه‌محوری، احتمال پارگی لوله کاهش یافته و درصد پرشدگی افزایش می‌یابد.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، در هر دو شکل، سطح پاسخ به‌صورت گنبدی شکل است؛ یعنی در مرکز بیشترین درصد نازک‌شدگی و در گوشه‌ها کمترین است.

در شکل (۱۳-الف) مشاهده می‌شود که با افزایش فشار درصد نازک‌شدگی افزایش می‌یابد، اما با افزایش تغذیه‌محوری، ابتدا درصد نازک‌شدگی افزایش و سپس کاهش می‌یابد. افزایش فشار داخلی منجر به تنش کشش در لوله شده و نازک‌شدگی افزایش می‌یابد. افزایش تغذیه‌محوری باعث تنش فشاری شده و لذا نازک‌شدگی کاهش می‌یابد. در مقادیر تغذیه‌محوری کم، تنش کشش ناشی از فشار داخلی بر تنش فشاری غلبه نموده و نازک‌شدگی بیشتر شده است، اما در مقادیر تغذیه‌محوری زیاد، تنش فشاری ناشی از آن بر تنش کششی غلبه نموده و نازک‌شدگی کاهش می‌یابد.

در شکل (۱۳-ب) مشاهده می‌شود که ابتدا با افزایش دما از ۵۳۰ تا ۵۵۰ درجه‌ی سانتی‌گراد، درصد نازک‌شدگی افزایش و سپس از دمای ۵۵۰ درجه تا دمای ۵۸۰ درجه‌ی سانتی‌گراد کاهش می‌یابد. دلیل این تغییرات ناشی از آن است که از یک طرف، با افزایش دما استحکام ماده کاهش یافته و مقدار تغییر شکل لوله افزایش می‌یابد و لذا درصد نازک‌شدگی نیز افزایش می‌یابد، از طرف دیگر با افزایش دما و فشار داخلی، احتمال پارگی در لوله نیز افزایش یافته که منجر به کاهش تغییر شکل لوله می‌شود.

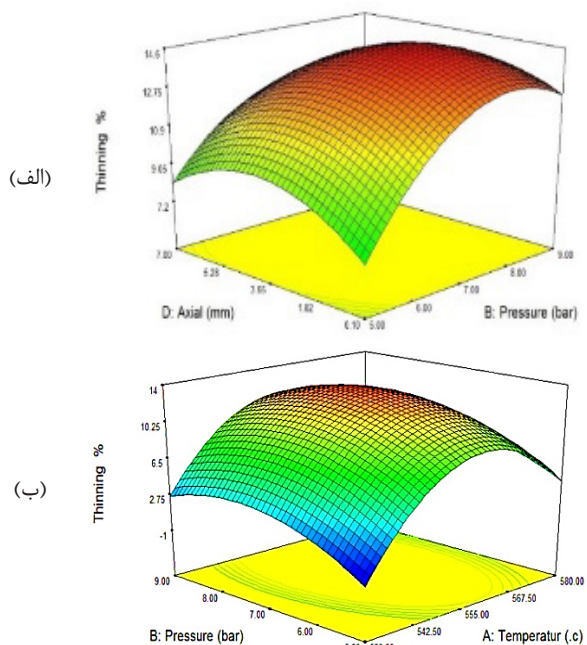
در شکل ۱۴، اثر متقابل سرعت سنبه با دما و فشار بر درصد نازک‌شدگی قالب نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در هر دو شکل، سطح پاسخ به‌صورت دوانحنایی یا زین‌اسبی است که نشان‌دهنده‌ی اثر متضاد سرعت سنبه با دما و فشار می‌باشد. رفتار سطح



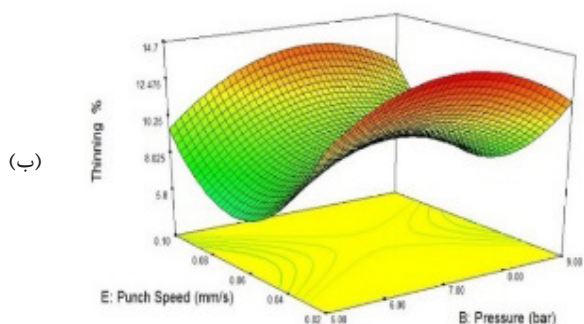
شکل ۱۲: اثر متقابل سرعت سنبه با (الف) دما، (ب) فشار، بر درصد پرشدگی قالب

۵-۲- بررسی تأثیر متقابل پارامترها بر درصد نازک‌شدگی

در شکل ۱۳، اثر متقابل فشار با دما و تغذیه‌محوری بر درصد نازک‌شدگی لوله نشان داده شده است.



شکل ۱۳: اثر متقابل فشار با (الف) تغذیه‌محوری، و (ب) دما، بر درصد نازک‌شدگی لوله



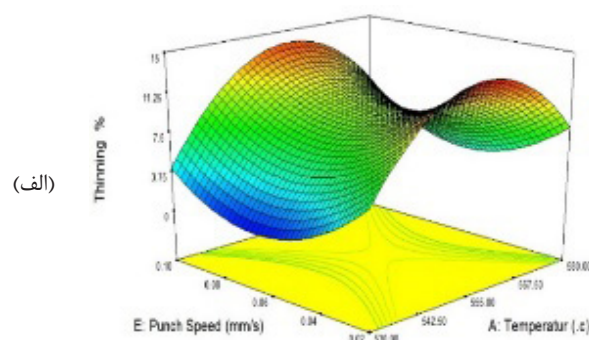
شکل ۱۴: اثر متقابل سرعت سنبه با (الف) دما، (ب) فشار، بر درصد نازک‌شدگی لوله

۵-۳- بهینه‌سازی

بعد از یافتن مدل‌های رگرسیونی، برای به‌دست‌آوردن بیشینه‌ی پرشدگی قالب و کمینه‌ی درصد نازک‌شدگی در بخش بهینه‌سازی نرم‌افزار دیزاین اکسپرت، جهت تعیین نقطه‌ی بهینه، مقدار درجه حرارت شکل‌دهی، فشار، نرخ فشار، تغذیه‌محوری و سرعت سنبه را به عنوان توابع هدف، و درصد پرشدگی قالب و درصد نازک‌شدگی لوله به عنوان اهداف مورد نظر آزمایشات در تجزیه و تحلیل‌های آماری به نرم‌افزار معرفی شد.

پاسخ در شکل (۱۴-الف) کاملاً مشابه با شکل (۱۲-الف) می‌باشد؛ یعنی با افزایش یا کاهش درصد پرشدگی، درصد نازک‌شدگی نیز افزایش یا کاهش یافته است.

در شکل (۱۴-ب) مشاهده می‌شود که در مقادیر سرعت سنبه و فشار بالا، با وجود افزایش درصد پرشدگی قالب، درصد نازک‌شدگی کاهش یافته است. همان‌طور که اشاره شد، در سرعت سنبه‌ی کم، افزایش فشار منجر به پارگی لوله می‌شود و با افزایش سرعت سنبه، عملاً مقدار تغذیه‌ی بیشتری در زمان واحد انجام شده و تغذیه‌محوری بر فشار داخلی غلبه می‌یابد.



Number	T	P	$\dot{P}$	A	V	Die Filling (%)	Thinning (%)
۱	۵۵۲	۶/۵	۰/۰۲	۶/۹	۰/۰۵	۹۱/۲	۱۰/۳۷
۲	۵۵۱/۵	۶/۶۴	۰/۰۲	۷	۰/۰۵	۹۱/۷	۱۱/۴۵
۳	۵۵۳	۷/۵	۰/۰۳	۶/۹۵	۰/۰۴	۸۹/۶۷	۹/۶۵
۴	۵۵۲/۵	۷/۰۸	۰/۰۲	۶/۹۱	۰/۰۵	۸۷/۳۷	۱۰/۲۵

جدول ۱۰: شرایط بهینه جهت یافتن بیشینه‌ی پرشدگی قالب و کمینه‌ی درصد نازک‌شدگی

درصد پرشدگی	
آزمایش	۹۲,۳
شبیه سازی	۸۷,۴
درصد خطا (%)	۵

جدول ۱۱: مقایسه‌ی تجربی و شبیه‌سازی درصد پرشدگی در دمای ۵۵۰ درجه‌ی سانتی‌گراد

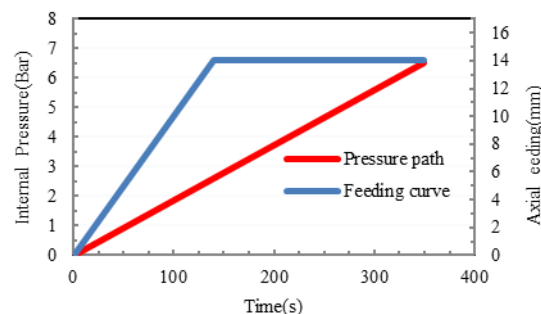
آزمایش تجربی در شرایط بارگذاری بهینه انجام شد که در شکل ۱۶ نشان داده شده است. میزان درصد پرشدگی قالب و درصد نازک‌شدگی قطعه‌ی تولیدشده به ترتیب ۹۲/۳ و ۹/۴۵ بود که با نتایج حاصل از مقدار پیش‌بینی‌شده توسط مدل تطبیق خوبی دارد. در شکل ۱۷، نمودار توزیع ضخامت نمونه‌ی شکل‌داده‌شده که در شبیه‌سازی و تجربی با یکدیگر مقایسه شده است. همان‌طور که در جدول ۱۱ نشان داده شده است، تفاوت بین درصد پرشدگی آزمایش و عددی کمتر از ۵٪ است.

۶- نتیجه‌گیری کلی

ترکیبی از روش سطح پاسخ و روش اجزای محدود جهت تعیین شرایط بهینه‌ی فرایند (دمای شکل‌دهی، فشار، نرخ فشار، تغذیه‌محوری و سرعت پانچ) با هدف دستیابی به بیشترین پرشدگی قالب و حداقل‌رساندن بیشترین نازک‌شدگی به کار گرفته شد. نتایج به‌دست‌آمده حاکی از این بود که تأثیرات درجه‌دو هر پنج متغیر مستقل معنی‌دار بود. برای هر پاسخ، با استفاده از آنالیز رگرسیون، مدل‌های چندجمله‌ای درجه‌دوم به‌دست آمد.

آنالیز واریانس (ANOVA) به‌منظور ارزیابی صحت و دقت مدل‌های به‌دست‌آمده اجرا گردیده و با توجه به نتایج موجود، نقطه‌ی بهینه‌ی به‌دست‌آمده عبارت است از ،

بهینه‌سازی متغیرهای وابسته با استفاده از روش سطح پاسخ انجام شد و نقاط بهینه که در جدول ۱۰ مشاهده می‌شود، مشخص گردید. مقادیر بهینه در دمای ۵۵۲ درجه‌ی سانتی‌گراد، فشار ۶/۵ bar، نرخ فشار ۶ bar/s، تغذیه‌محوری ۷ mm از هر طرف و سرعت سنبه ۰/۰۵ mm/s با درصد پرشدگی ۹۱/۲ و درصد نازک‌شدگی ۱۰/۳۷ حاصل شد.

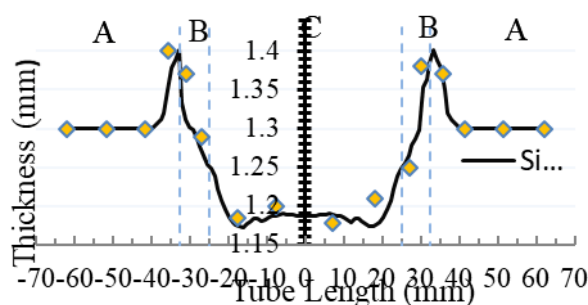


شکل ۱۵: مسیر بارگذاری بهینه

در شکل ۱۵، مسیر بارگذاری بهینه نشان داده شده است. مشاهده می‌شود نرخ اعمال تغذیه‌محوری (سرعت سنبه) سریع‌تر از نرخ فشار اعمالی و در زمان ۱۴۰ ثانیه به ماکزیمم مقدار خود رسیده و سپس تا زمان ۳۵۰ ثانیه، با افزایش فشار، مقدار تغذیه‌محوری ثابت باقی می‌ماند.



شکل ۱۶: لوله‌ی پله‌ای استوانه‌ای شکل داده‌شده با مسیر بارگذاری بهینه



شکل ۱۷: نمودار توزیع ضخامت در شبیه‌سازی و تجربی در دمای ۵۵۰ °C

filler tube hydroforming by genetic algorithm". Journal of Engineering Manufacture, Vol. 229(4), pp. 623-630.

[6] Teng, B., Li, K., Yuan, S., 2013. "Optimization of loading path in hydroforming T-shape using fuzzy control algorithm". International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 69(5-8), pp. 1079-1086.

[7] Rajaei, M., Hosseini-pour, S. J., Jamshidi Aval, H., 2021. "Multi-objective Optimization of HMGP Process Parameters for Manufacturing AA6063 Stepped Tubes using FEM-RSM". International Journal of Engineering, Vol. 34, No. 05, pp. 1305-1312.

[8] Liu, G., Wu, Y., Wang, D., and Yuan, S., 2015. Effect of feeding length on deforming behavior of Ti-3Al-2.5 V tubular components prepared by tube gas forming at elevated temperature, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 81, No. 9-12, pp.1809-1816.

[9] Vadillo, L., Santos, M. T., Gutierrez, M. A., Pérez, I., González, B., and Uthaisangsuk, V., 2007. Simulation and experimental results of the hot metal gas forming technology for high strength steel and stainless steel tubes forming, AIP Conference Proceedings, vol. 908, No. 1, pp. 1199-1204.

[10] Liu, Y. Wu, G., Liu, Z., 2016. Wang, Formability and microstructure of Ti22Al24. 5Nb0. 5Mo rolled sheet within hot gas bulging tests at constant equivalent strain rate, Materials & Design, Vol. 108, No. 1, pp.298-307.

[11] Maeno, K. M. T., and Fujimoto, K., 2014. Hot gas bulging of sealed aluminum alloy tube using resistance heating, Materials Manufacturing Rev, Vol. 1, pp. 1-6.

دما ۵۵۲ درجه‌ی سانتی‌گراد، فشار ۶/۵ bar، نرخ فشار ۰/۰۲ bar/s، تغذیه‌محوری ۷ mm و سرعت تغذیه ۱۰/۰۵ که پرشدگی ۹۱/۲ درصد و نازک‌شدگی ۱۰/۳۷ درصد حاصل شد. مدل ارائه‌شده برای پیش‌بینی مقادیر متغیرهای وابسته نتایج بسیار نزدیکی با یافته‌های تجربی به‌دست‌آمده داشت.

۷-مراجع

[1] Koc, M., Altan, T., 2002. "Prediction of forming limits and parameters in the tube hydroforming process". International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 42, pp. 123-138.

[2] Kadkhodayan, M., Erfani-Moghadam, A., 2012. "An investigation of the optimal load paths for the hydroforming of T-shaped tubes". Int J Adv Manuf Technol, Vol. 61, pp. 73-85.

[3] Ahmadi Brooghani, S. Y., Khalili, K., Eftekhari Shahri, S. E., Kang, B. S., 2014. "Loading path optimization of a hydroformed part using multilevel response surface method". The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 70, pp. 1523-1531.

[4] Abedrabbo, N., Worswick, M., Mayer, R., Riemsdijk, V., 2009. "Optimization methods for the tube hydroforming process applied to advanced high-strength steels with experimental verification". Journal Mater Process Technol, Vol. 209(1), pp. 110-123.

[5] Intarakumthornchai, T., Aue-U-Lan, Y., Kesvarakul, R., Jirathearanat, S., 2015. "Feasible pressure and axial feed path determination for fuel

[۱۶] فضایی، ابوالفضل، شهبازی کرمی، جواد، حبیبی، مصطفی، پایگانه، غلامحسین، ۱۳۹۷. "بررسی تجربی و المان محدود فرآیند شکل‌دهی داغ با گاز لوله‌های تیتانیومی و تولید قطعه با سطح مقطع مربعی". فصلنامه علمی- پژوهشی مکانیک هوافضا، جلد ۱۴، شماره ۲، صفحه‌ی ۸۹ الی ۹۹

[17] Drezet. J. M, Phillion. A. B., 2010. "As-Cast Residual Stresses in an Aluminum Alloy AA6063 Billet: Neutron Diffraction Measurements and Finite Element Modeling". Journal of Metallurgical and Materials Transaction, Vol. 41, pp. 3396–3404.

[12] Drezet, J. M., Phillion, A. B., 2010. "As-Cast Residual Stresses in an Aluminum Alloy AA6063 Billet: Neutron Diffraction Measurements and Finite Element Modeling". Journal of Metallurgical and Materials Transaction, Vol. 41.

[13] Shamsi-Sarband, A., Hosseini pour, S. J., Bakhshi-Jooybari, M., Shakeri, M., 2013. "The Effect of Geometric Parameters of Conical Cups on the Preform Shape in Two-Stage Superplastic Forming Process". Journal of Materials Engineering and Performance, Vol. 22, No. 12, pp. 3601–3611.

[14] Rajaei, M., Hosseini pour, S. J., Jamshidi Aval, H., 2019. "Tearing criterion and process window of hot metal gas forming for AA6063 cylindrical stepped tubes". The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, pp. 2609-2620.

[15] Alimov, A., Haase, R., Sviridov, A., 2022. "Upset bulging as a preforming operation for hot metal gas forming of 22MnB5 tubes". International Deep-Drawing Research Group Conference, IOP Conf. Ser: 1238 012016.

اثر دبی سیال گرم و نانولوله‌ی کربنی-آب بر عملکرد نانوسیال در تبادل گر حرارتی صفحه‌ای و اشردار

امید رمضانی ازغندی^{۱*}، محمدعلی نوع پرست^۲

۱- دکتری؛ دانشکده‌ی مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

۲- شرکت دانش بنیان ثنا مبدل توسعه‌ی پارس مشهد، مشهد، ایران.

چکیده

در این مقاله، به کمک فعال کننده‌ی سطحی سدیم دودسیل سولفات، نانولوله‌ی کربنی در سیال پایه‌ی آب پایدار گردید. نانوسیال ۰/۰۱ وزنی تهیه شده (نانولوله‌ی کربنی چندجداره-آب) در مجاور سیال گرم آب دیونیزه، در تبادل گر گرمایی صفحه‌ای که دارای ۱۳ صفحه است، قرار گرفت. جهت بررسی گروه‌های عاملی، تجزیه و تحلیل ساختاری و ریخت شناسی نانوذره از طیف سنج پراش انرژی پرتو ایکس، طیف سنج مادون قرمز فوری، طیف سنج رامان و تصویر میکروسکوپ الکترونی عبوری استفاده شد. اثر تغییر دبی سیال گرم و نانوسیال بر ضریب انتقال حرارت و افت فشار نانوسیال به صورت آزمایشگاهی مورد آنالیز قرار گرفت. نتایج در محدوده‌ی جریان آرام نشان دادند که بیشتر شدن دبی سیال گرم باعث افزایش ضریب کلی انتقال حرارت (۵۳/۴۷٪) و کاهش افت فشار نانوسیال می‌گردد که هر دو نتیجه در میحث انتقال حرارت مطلوب است. همچنین مشخص گردید که افزایش دبی نانوسیال باعث رشد ۴۳/۴٪ ضریب کلی انتقال حرارت نانوسیال می‌گردد. برای مشخص شدن اثر نانوسیال بر عملکرد تبادل گر گرمایی نسبت به حالت بدون نانوسیال (آب-آب)، بررسی‌ها ادامه یافت و مشخص گردید افزایش دبی سیال گرم و سیال سرد به ترتیب باعث افزایش ۲۲/۹٪ و ۱۷/۳٪ می‌گردد که بیان کننده‌ی اثر مطلوب استفاده از نانولوله‌ی کربنی در دبی‌های زیاد است.

کلمات کلیدی

نانولوله‌ی کربنی، فعال کننده‌ی سطحی، ضریب انتقال حرارت، تبادل گر حرارتی، بستر آزمایشگاهی.

The effect of hot fluid and Nanotube-Water Flow Rate on the Efficiency of Nanofluid on Gasket-plate heat exchanger

Omid Ramezani Azghandi^{*1}, Mohammad Ali nopara²

1- PhD, Department of Mechanical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

2- Sana Mobadel Tose pars company, Mashhad, Iran.

Abstract

In this paper, the Carbon nanotube was stabilized in a water-based fluid by sodium dodecyl sulfate as a surfactant. Then, hot fluid (water) was in contact with the nanofluids (carbon nanotube -weight percentage of 0. 01) on both sides of the heat exchanger plate that has 13 plates. In order to investigate the functional groups and morphology of nanoparticles, obtained by FTIR, EDX, Raman analysis, Transmission, and Scanning electron microscopes images were used. The effect of the flow rate of hot fluid and nanofluid on the heat transfer coefficient and pressure drop was analyzed experimentally. The results in the range of laminar flow showed that the heat transfer coefficient increased by the flow rate of hot fluid and nanofluid rising (53.47% and 43.4%, respectively) and decreases the pressure drop of nanofluid, which are both positive effects. Determining the effect of nanofluid on the efficiency of the heat exchanger compared to the state without nanofluid (water-water), it was found that the increase in the flow rate of hot fluid and cold fluid causes an increase of 22.9% and 17.3%, respectively. It indicates the benefit of using carbon nanotubes in high stated flow rates.

Keywords

Carbon nanotube, Surfactant, Heat Transfer Coefficient, Heat Exchanger, laboratory set

۱- مقدمه

استفاده از نانوذره‌های مختلف [۱-۲] و افزودن آن‌ها به سیال‌های پایه‌ی متفاوت، نظیر آب، اتانول، روغن، اتیلن گلیکول و غیره [۳] در جهت بهبود خواص آن‌ها که تحت عنوان نانوسیال معرفی شده‌اند [۴]، یک روش مطلوب در کاربردهای متفاوت انتقال حرارت است. با توجه به نوع نانوذره و روش سنتز آن، از روش‌های متفاوت برای پایداری‌سازی استفاده می‌شود. به‌طور کلی می‌توان این روش‌ها را به دو دسته‌ی کووالانسی (عملکردی) یا غیرکووالانسی (غیرعملکردی) دسته‌بندی کرد [۵-۷] که در روش‌های غیرعملکردی از یک فعال‌کننده‌ی سطحی^۱ (سورفکتانت)، بسته به نوع سیال پایه استفاده می‌گردد که باعث تغییر کشش سطحی و پایداری بهتر نانوذره در سیال پایه‌ی مورد نظر است [۸-۹]. در چند دهه‌ی گذشته، علاوه بر استفاده از نانوسیال برای بهبود انتقال حرارت، از تبادل گرهای حرارتی متفاوت برای بهبود ضریب انتقال حرارت و شرایط مطلوب استفاده شده است [۱۰-۱۱]. به عنوان نمونه، ارتورک و همکاران اثر نانوسیال گرافن-آب بر میزان افت فشار و ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی در جریان گذرا را در مبدل حرارتی بررسی کردند و نشان دادند که میزان افت فشار در جریان گذرا بیشتر از جریان آرام و آشفته است [۱۱]. رضانی و همکاران [۱۲] اثر شکل صفحه‌های (چین و چروک) تبادل گر گرمایی و اشردار بر میزان انتقال حرارت و افت فشار هیبرید گرافن-نانولوله‌ی کربنی بررسی کردند و نشان دادند که صفحه‌های با زاویه‌ی شوری ۴۵ درجه (نوع M) دارای شرایط بهینه و مطلوب است و اثرگذاری بهتری بر نتایج دارد. نانوسیال مورد استفاده در این مقاله در سمت سیال گرم استفاده شده بود. آن‌ها در تحقیق دیگری [۱۳] به بررسی اثر تغییر غلظت و دبی نانوسیال گرافن-آب بر

ضریب انتقال حرارت، افت فشار و راندمان حرارتی نانوسیال پرداختند و نشان دادند که افزایش غلظت باعث افزایش هم‌زمان ضریب انتقال حرارت و افت فشار می‌گردد که نتایج مثبت و منفی را به‌همراه دارد. بیان گردید که کم‌شدن دبی نانوسیال که در سمت سرد تبادل گر استفاده شده، اثر بیشتری نسبت به افزایش غلظت نانوسیال دارد. همچنین بیشترین پایداری به کمک آنالیز پتانسیل زتا مربوط به درصد وزنی ۰/۰۱ به‌دست آمد. در مقاله‌ی دیگری [۱۴]، با تغییر سطح تبادل حرارتی از طریق افزایش تعداد صفحه در تبادل گر گرمایی و اشردار، به بررسی اثر دبی نانوسیال هیبرید گرافن-نانولوله‌ی کربنی (به عنوان سیال سرد) بر ضریب کلی انتقال حرارت، افت فشار، راندمان حرارتی نانوسیال و توان پمپاژ پرداخته‌اند و مشخص شد که افزایش تعداد صفحه (افزایش سطح حرارتی) باعث افزایش راندمان و کاهش توان پمپاژ تبادل گر می‌گردد. همچنین نشان دادند که اثر افزایش صفحه با توجه به افزایش هزینه، تنها کمی از اثر افزایش دبی سیال بر راندمان حرارتی مؤثر است.

در این مقاله، به کمک فعال‌کننده‌ی سطحی سدیم دودسیل سولفات (روش غیرعملکردی)، نانوسیال حاوی نانولوله‌ی کربنی چندجداره در درصد وزنی ۰/۰۱ تهیه شد. نانوسیال تهیه‌شده در بستر آزمایشگاهی مجهز به تبادل گر گرمایی صفحه‌ای و اشردار به‌کار گرفته شد و سعی شد که اثر تغییر یک سیال که در یک سمت تبادل گر است (به عنوان نمونه روی صفحه‌های زوج در جریان است)، بر روی نتایج سمت دیگر تبادل گر (صفحه‌های فرد) بررسی گردد که تا زمان نگارش این مقاله (به روش بیان‌شده، روی اثر تقابلی دو سیال نانولوله -آب) تحقیقی مشاهده نشده است. در نتیجه نویسندگان با این پژوهش در تلاش هستند تا گپ‌های موجود را

هستند که حاصل خودآرایی مولکول‌های فعال‌کننده‌ی سطحی (پایدارکننده‌ها) در حدفاصل فاز آبی و آلی می‌باشند.

برای این منظور، ابتدا ۱ gr فعال‌کننده‌ی سطحی به آرامی به ارلن حاوی آب دیونیزه که روی همزن مغناطیسی قرار دارد، اضافه می‌شود و به مدت ۲۵ min، به کمک مگنت به‌خوبی هم زده می‌شود. سپس به میزان ۰/۱ gr از نانولوله‌ی کربنی به محتویات ارلن اضافه می‌شود و به کمک یک التراسونیک پروب‌دار (قدرت ۸۰۰ w به مدت ۴۰ min)، به‌خوبی هم زده می‌شوند. درانتها نانوسیال پایدار در ۴۰ درصد وزنی ۰/۰۱ تهیه می‌شود. نمونه‌های تهیه‌شده با این روش به مدت طولانی پایدار است و هیچ‌گونه رسوب و ته‌نشینی‌ای در آن‌ها دیده نشد. در این پژوهش، تمام آزمایش‌ها در دمای 24°C انجام شد. باید عنوان گردد که قبل از پایداری نیاز است که نانوذره‌ها شست‌وشو داده شوند که اگر در زمان سنتز، مواد ناخواسته نظیر دوده به نانوذره چسبیده باشد، عاری گردد. درنتیجه قبل از پایدارسازی به کمک محلول اسیدسولفوریک (جرم مولکولی = ۹۸ gr/mol، دانسیته = ۱/۸۴ kg/lit، خلوص ۹۸٪) و اسید نیتریک (جرم مولکولی = ۶۳/۹ gr/mol، دانسیته = ۱/۴۰ kg/lit، خلوص ۶۵٪) که به نسبت ۳-۱ حجمی می‌باشند، درون یک همگن‌ساز حمام‌دار کاملاً هم زده و به کمک سانتریفوژ که دارای ۵۰۰۰ دور بر دقیقه است، با آب دیونیزه شست‌وشو داده می‌شود که از اسیدهای واکنش‌نداده نیز عاری گردد و پودر ذره در انتها به‌دست آید. البته باید اذعان کرد طی این مرحله امکان دارد گروه‌های آب‌دوست و قطبی کربوکسیل (COOH-) و هیدروکسیل (OH-) بر ساختار نانوذره بچسبند و به‌نوعی نانوذره عامل‌دار گردد که باعث پایداری بیشتر می‌گردد.

مرتفع سازند. بر این اساس اثر دبی سیال گرم (سیال آب) بر میزان ضریب کلی انتقال حرارت، افت فشارها نانوسیال بررسی گردید. آزمایش برای درصد وزنی ۰/۰۱، انجام شده است. همچنین برای این که مشخص گردد که روش و استفاده از نانوسیال بیان‌شده باعث بهبود انتقال حرارت و عملکرد تبادل گر می‌گردد، کارآیی تبادل گر برای دو حالت نانوسیال و بدون استفاده از نانوسیال (آب-آب) بررسی شده است.

۲- بخش تجربی

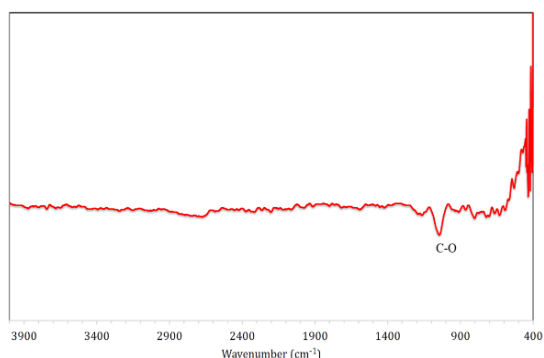
۲-۱- مواد اولیه و روش تهیه

برای تهیه‌ی نانوسیال حاوی نانولوله‌ی کربنی چندجداره، از فعال‌کننده‌ی سطحی سدیم دودسیل سولفات (۵۰ gr)، محصول شرکت آزمیران ایران، نانولوله‌ی کربنی چندجداره^۱ (قطر ۲۰-۳۰ nm و طول ۱۰-۵ μm) و محصول شرکت VCN، gr۵، آب دیونیزه (۱۵۰ لیتر، پی اچ خنثی، از داخل ایران) استفاده گردید. فعال‌کننده‌های سطحی معمولاً ترکیباتی آلی هستند که دارای گروه‌های هیدروفوبیک (دافع آب) که نقش دم و دنباله را دارد و گروه‌های هیدروفیلیک (جاذب آب) که نقش سر را دارد؛ بنابراین به تناسب ساختار مولکولی، در حلال‌های آب و آلی حل می‌شوند و باعث کم‌شدن کشش سطحی در فصل مشترک آب می‌شوند. در این روش، نانولوله‌ها با بخش آب‌گریز مایسل‌ها^۲ احاطه می‌شوند و بخش آب‌دوست مایسل‌ها نیز با حلال اطراف در تماس است. جذب فیزیکی سورفکتانت‌ها بر سطح نانولوله‌های کربنی کشش سطحی نانولوله‌ها را کم کرده و از تشکیل توده‌های آن‌ها جلوگیری می‌کند و تنها عامل جلوگیری از انباشتگی است. مایسل‌ها ساده‌ترین واکنش‌گاه‌های مولکولی

۱- MWCNTs

۲- Micelles

به‌خصوص در دو مولکول متفاوت در دو محیط متفاوت قرار داشته؛ بنابراین هیچ‌گاه دو مولکول با ساختمان‌های متفاوت جذب مادون‌قرمز یا به عبارت بهتر طیف مادون‌قرمز مشابه نمی‌دهند. شکل ۱ طیف مادون‌قرمز تبدیل فوری به برای نانولوله‌ی کربنی چندجداره‌ی خام آمده است. تنها در حوالی ۱۱۰۰، یک پیک مشاهده می‌شود که به‌دلیل پیوند C-O است. صحت نتیجه نیز با مقایسه با کار محققان به‌دست آمد. گودرزی و همکاران در سال ۲۰۱۵ [۱۵] و شنبدی و همکاران در سال ۲۰۱۸ [۱۶] به بررسی و شناسایی پیک‌های آنالیز طیف‌سنج مادون‌قرمز فوری به پرداخته که در این حوالی آن‌ها نیز وجود اکسیژن در ماده‌ی خام نانولوله (پیک در این حوالی) را گزارش کرده است.



شکل ۱- آنالیز طیف‌سنج مادون‌قرمز فوری به برای نانولوله‌ی کربنی چندجداره

۳-طیف‌سنج رامان^۴: یکی از اصلی‌ترین کاربردهای طیف‌سنجی رامان در بحث نانوساختارهای کربنی تعیین‌کردن نسبت گروه‌های بی‌نظم به گروه‌های مماسی است. هیبریداسیون کربن موجود در نانولوله‌ی کربنی (دارای خلوص بالا) sp^2 است و اضافه‌شدن گروه‌های عاملی به ساختار اصلی آن‌ها موجب تغییر هیبریداسیون

جهت ریخت‌شناسی^۱ پودر به‌دست‌آمده‌ی طیف‌سنج پراش انرژی پرتوایکس (جدول ۱)، طیف‌سنج مادون‌قرمز فوری به (شکل ۱)، طیف‌سنج رامان (شکل ۲) و تصویر میکروسکوپ الکترونی عبوری (شکل ۳) انجام گردید.

۱-طیف‌سنج پراش انرژی پرتوایکس^۲: برای تجزیه و تحلیل ساختاری و خصوصیات شیمیایی نمونه از طیف‌سنج پراش انرژی پرتوایکس استفاده شد. اصول طراحی بر پایه‌ی تابش پرتوایکس به نمونه در زوایای مختلف و تحلیل الگوی پراش یا بازتابش آن است. جدول ۱ طیف‌سنجی پراش انرژی پرتوایکس نانولوله‌ی کربنی را نشان می‌دهد.

جدول ۱- طیف‌سنجی پراش انرژی پرتوایکس برای نانولوله‌ی کربنی چندجداره

غلظت وزنی	غلظت اتمیک	نام عنصر	نشانه	تعداد عناصر	مواد
۹۳/۰۲	۹۴/۶۷	کربن	C	۶	نانولوله‌ی کربنی چندجداره
۶/۹۸	۵/۳۳	اکسیژن	O	۸	

۲-طیف‌سنج مادون‌قرمز فوری به^۳: طیف‌سنج تبدیل فوری به مادون‌قرمز روشی برای شناسایی مولکول‌ها و به‌خصوص گروه‌های عاملی موجود در ترکیبات است. دستگاهی که طیف جذبی یک ترکیب را حاصل می‌کند یک دستگاه طیف‌سنج مادون‌قرمز یا به عبارت دقیق‌تر یک اسکپتروفتومتر خوانده می‌شود. هر ماده‌ای طیف مادون‌قرمز مخصوص به خود دارد و همانند اثرانگشت مختص خود مولکول است؛ چون هر پیوند دارای فرکانس ارتعاش طبیعی خاصی است و نیز چون یک پیوند

۱- Morphology

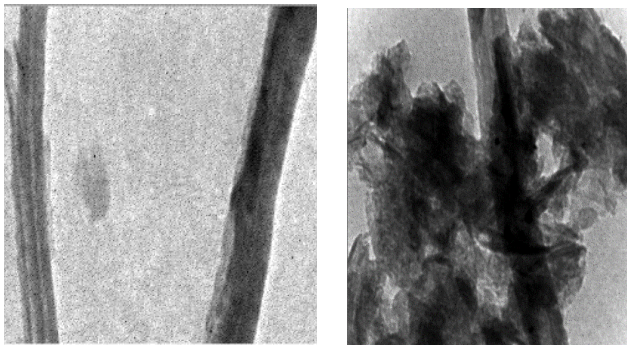
۲- EDX

۳-FTIR

۴- Raman

کربن و تبدیل آن به sp^3 می‌شود.

عبور می‌کنند، انرژی خود را ازدست می‌دهند و از طرف دیگر، نمونه با انرژی خاص آن عنصر روی یک صفحه‌ی فلورسنت یا دوربین نمایش داده شده و در بزرگ‌نمای بالا و توان تفکیک بالا ثبت می‌شوند. معمولاً می‌توان در عکس‌های مربوط به نانولوله‌های کربنی، نقض‌های موجود بر روی سطح، کاهش یا افزایش قطر، کوتاه‌شدن طول و بریده‌شدن را بررسی کرد. در شکل ۳، تصاویر به‌دست‌آمده از میکروسکوپ الکترونی عبوری مرتبط با نانولوله‌های کربنی چندجداره‌ی خام و بعد از شست‌وشو و خالص‌سازی است که می‌توان دید ساختار اصلی نانولوله‌های کربنی چندجداره کاملاً سالم مانده است.



ب

الف

شکل ۳ تصاویر میکروسکوپ الکترونی عبوری از نانولوله‌ی کربنی

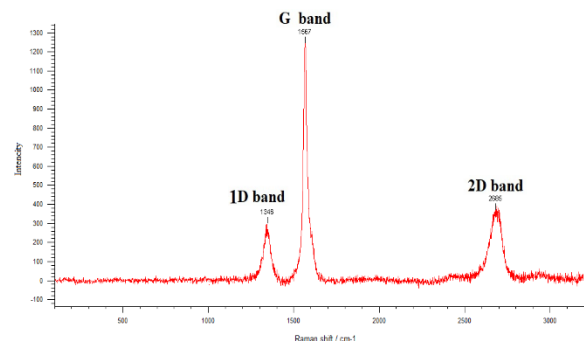
الف-نانولوله‌ی کربنی جداره بعد از خالص‌سازی

ب-نانولوله به همراه خوشه

۲-۲- بستر آزمایشگاهی

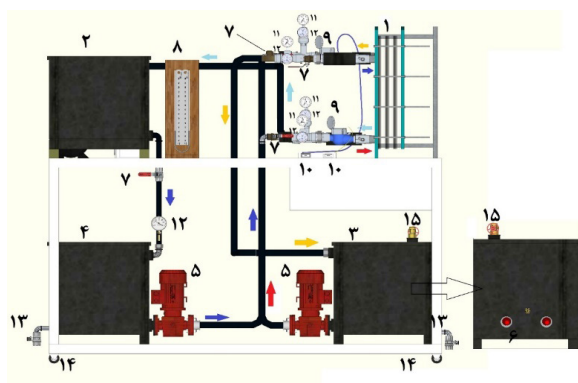
شکل‌های ۴ و ۵ شماتیک دستگاه و بستر ساخته‌شده جهت بررسی ضریب کلی انتقال حرارت و افت فشار نانوسیال (نانولوله‌ی کربنی-آب) در رژیم جریان آرام نشان داده شده است. بستر شامل دو حلقه‌ی گرم و سرد است

گروه‌های بی‌نظم (D باندها) در نانولوله‌ی کربنی دارای هیبریداسیون sp^3 و گروه‌های مماسی (G باندها) شامل هیبریداسیون sp^2 است. افزایش گروه عاملی در جهت تخریب π الکترون‌های موجود در ساختار نانولوله و ایجاد نقاط فعال مناسب برای واکنش با سایر مواد که به معنای تغییر تعدادی از هیبریدهای sp^2 به sp^3 است. نتایج طیف‌سنجی رامان جهت تعیین ساختار شیمیایی نانولوله‌ی کربنی چندجداره‌ی اولیه در شکل ۲ مشاهده می‌گردد. صحت نتیجه با مقایسه‌ی مقاله‌ی امیری [۱۷] و شنبیدی [۱۸] به‌دست آمد. به‌طور کلی نتایج طیف‌سنج تبدیل فوریه‌ی مادون‌قرمز و رامان شبیه به هم هستند، ولی طیف‌سنجی رامان اطلاعات بارزتری را نیز در زمینه‌ی فیزیک حالت جامد ارائه می‌کند.



شکل ۲- آنالیز طیف‌سنج رامان برای نانولوله‌ی کربنی

۴- میکروسکوپ الکترونی عبوری^۱: جهت بررسی ریخت‌شناسی از میکروسکوپ الکترونی عبوری استفاده شد. به‌طور کلی آماده‌سازی نمونه‌های میکروسکوپ الکترونی عبوری مشتمل بر دو مرحله‌ی آماده‌سازی اولیه و نازک‌کردن نهایی نمونه به روش‌های مختلف است. درواقع، هنگامی که الکترون‌ها (پرتو الکترون) در میکروسکوپ الکترونی عبوری از درون نمونه (عنصر)



شکل ۴- شماتیک دستگاه آزمایش

۱- تبادله گر صفحه‌ای (مدل ام ۳- ۱۳ صفحه‌ای برند ثنا مبدل با زاویه‌ی شورون ۴۵ درجه). ۲- قسمت سرمایش (منبع سرمایش ثانویه، توان ۱/hp۵، حاوی گاز R۴۰۴). ۳- منبع ذخیره‌ی گرم (۱۲۵ lit، جنس استنلس استیل ۳۰۴، مجهز به المنت گرمایی). ۴- منبع ذخیره‌ی سرد (۱۲ lit، جنس استنلس استیل ۳۰۴). ۵- پمپ (برند نوید مدل اس ۱۰۰). ۶- المنت‌های گرمایی (هیت‌ر). ۷- شیرهای تنظیم دبی و ورود و خروج سیال. ۸- اختلاف فشارسنج جیوه‌ای U شکل. ۹- کنترلر. ۱۰- شمارنده کنترلر جهت بررسی دبی. ۱۱- فشارسنج (مانومتر برند پکنز، ۱۶۰ mbar-۰، ۴ عدد). ۱۲- ترمومتر (برند پکنز، ۱۲۰°C-۰، ۵ عدد). ۱۳- دریچه برداشت نمونه و تخلیه سیال. ۱۴- چرخ، ۱۵- شیر اطمینان فشار.



شکل ۵- بستر آزمایشگاهی مورد استفاده

که هرکدام دارای مخزن نگهداری سیال، پمپ، بخش اندازه‌گیری فشار و دما (قبل و بعد از تبادله گر) و بخش مربوط به اندازه‌گیری دبی سیال است. جهت اندازه‌گیری افت فشار مانومتر U شکل نیز در سیستم نصب شده است و برای به حداقل رساندن اتلاف حرارت در مسیر سیال، از عایق الاستومری استفاده شده است. همچنین در قسمت منبع گرم، دو المنت گرمایی مجهز به ترموستات قرار دارد. برای اینکه دمای سیال سرد (نانوسیال) بعد از تبادله حرارتی در تبادله گر به دمای ابتدایی برسد، در مسیر سیال سرد و قبل از منبع ذخیره‌ی سیال سرد، از یک سیستم سردساز استفاده شده است. یک ترمومتر اضافه جهت بررسی دمای برگشت سیال سردشده در سیستم سردساز به تانک ذخیره نیز تعبیه شده است تا زمانی که به دمای اولیه‌ی سیال برسد، شیر باز شده و سیال از منبع سردسازی به منبع ذخیره منتقل گردد.

در تمام آزمایش‌ها، تبادله گر گرمایی دارای ۱۳ صفحه است که با تغییر دبی ورودی سیال گرم، در یک دبی مشخص سیال سرد آزمایش‌ها انجام می‌گیرد و سپس دبی سیال سرد به کمک شیرهای تعبیه‌شده در بستر تغییر داده شده و آزمایش‌ها تکرار می‌گردد. قبل از شروع آزمایش‌های نانوسیال، تبادله گر با سیال آب-آب تست می‌شود (جهت اعتبارسنجی دستگاه و مقایسه با حالت نانوسیال در مرحله‌ی بعد)، سپس با نانوسیال (به عنوان سیال سرد) و آب (سیال گرم) آزمایش‌ها ادامه پیدا می‌کند. در این تحقیق، دمای سیال سرد ۲۴°C و سیال گرم ۶۰°C است.

همچنین به کمک رابطه ی ۱، توان پمپ برای دو حالت نانوسیال-آب و آب-آب (بدون استفاده از نانوسیال) را می توان به دست آورد [۵].

$$\left(\frac{W_f}{W_b}\right) = \left(\frac{\mu_f}{\mu_b}\right) \left(\frac{\rho_b}{\rho_f}\right)^2 \quad (1)$$

به کمک رابطه ی ۲ می توان کارایی یا عملکرد^۱ تبادل گر گرمایی را محاسبه کرد. برای این که از لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه باشد، باید نسبت ضریب جابه جایی انتقال حرارت به نسبت توان پمپاژ در دو حالت استفاده از هیبرید و بدون نانوسیال بیشتر از یک باشد [۱۹].

$$\eta = \frac{\left(\frac{h_f}{h_b}\right)}{\left(\frac{W_f}{W_b}\right)} \quad (2)$$

در روابط بالا، h ، μ ، ρ و w به ترتیب چگالی سیال، گرانشی، ضریب انتقال حرارت جابه جایی و توان پمپ است. همچنین نماد زیرنویس nf نانوسیال و b سیال پایه است.

برای بررسی خطا، به این دلیل که در تکرار آزمایش از مقدار میانگین استفاده می شود و انحراف از مقدار میانگین ممکن است گاهی مثبت و گاهی منفی باشد و متوسط آن ها برابر صفر گردد، از اختلاف معیار استفاده می گردد، ولی متداول است که از انحراف معیار که مجذور اختلاف معیار است، طبق رابطه ی ۳ استفاده گردد. برای محاسبه ی خطای دستگاهی نیز از رابطه ی ۴ استفاده شد^۲. در رابطه ی ۳، ثابت n تعداد اندازه گیری ها و $\bar{x}$ مقدار میانگین آزمایش است. برای عدم قطعیت آزمایش ها نیز از رابطه ی کلین-مک کلانتاک^۳ استفاده

جدول ۲ پارامترهای هندسی تبادل گر مورد استفاده را نشان می دهد. تبادل گر صفحه ای دارای جریان معکوس تک گذر، ۱۳ صفحه و دارای فریم U شکل است (تمام ورود و خروج های سیال روی فریم جلو است).

جدول ۲- مشخصه های هندسی تبادل گر ام ۳

پارامتر	مقدار
طول صفحه (L)	۰/۴۲۹ m
عرض صفحه (w)	۰/۱۲۵ m
فاصله ی پورت-پورت طولی (Lp)	۰/۳۵۷ m
فاصله ی پورت-پورت عرضی (Lw)	۰/۰۶ m
دهانه ی ورود و خروج سیال، (Dp)	۰/۰۳۱ m
ضخامت صفحه ها (t)	۰/۰۰۰۵ m
گام صفحه	۰/۰۰۳ m
فاصله ی دو فریم تبادل گر (Lc)- برای ۱۳ صفحه	۰/۰۳۹ m
سطح تبادل کل (At)- برای ۱۳ صفحه ضخامت و اثر	۰/۴۱۶ m ^۲ ۰/۰۰۰۲۵ m

با استفاده از بستر آزمایشگاهی تهیه شده و روابط و جدول ارائه شده توسط رضانی [۱۴]، به کمک یادداشت دما و فشار برای سیال سرد و گرم در ورود و خروج تبادل گر و دبی های ثبت شده در ورودی هر سیال، خواص ترموفیزیکی هر سیال (نظیر چگالی، ظرفیت گرمایی ویژه، ضریب هدایت حرارتی و گرانشی (لزجت))، سرعت جرمی در کانال و در دهانه ی ورود و خروج، عدد رینولدز، عدد پرانتل، کسر حجمی و وزنی، عدد ناسلت، ضریب انتقال حرارت جابه جایی و ضریب کلی انتقال حرارت، ضریب اصطکاک فانیگ، افت فشار برای کانال و پورت و افت فشار کل به روش مشابه محاسبه می گردند.

۱- Efficiency

۲- Bechwith

۳- Kline and McClontock

۳- نتایج و بحث

در مطالعه‌ی، حاضر از نانوسیال در غلظت ۰/۰۱ wt. % استفاده گردید. دبی‌های ورودی سیال گرم ۵-۲ lpm است. برای تست بستر آزمایشگاهی، ابتدا برای سیال‌های آب-آب آزمایش‌ها انجام گردید و سپس برای نانولوله‌ی کربنی-آب آزمایش‌ها انجام شد. برای کمتر شدن خطای آزمایش‌ها، تمام گیج‌ها کالیبره شده‌اند و از عایق الاستومری (با رعایت شعاع بحرانی لوله) برای جلوگیری از اتلاف حرارت استفاده شد، تست‌های هیدرولیک و اسیدشویی تبادل‌گر بعد از هر آزمایش انجام گردید و تمام آزمایش‌ها با ۴ مرتبه تکرار صورت پذیرفت تا خواص ترموفیزیکی با دقت بیشتر حاصل گردد. همچنین برای صحت نتایج، مجموع مربعات خطا و نوار خطا روی نمودار رسم گردید.

در شکل ۶، نتایج به‌دست‌آمده از منحنی‌های ضریب کلی انتقال حرارت برحسب دبی حجمی برای سیال آب-آب رسم شده است. دبی حجمی سیال گرم ۳ lpm در نظر گرفته شده است. با مقایسه‌ی نتایج به‌دست‌آمده از نمودار ضریب کلی انتقال حرارت برحسب دبی حجمی سیال با نتایج تایوار و همکاران [۲۰]، مشخص گردید که تفاوت اندک مربوط به زاویه‌ی شوری و شاید مقدار تفاوت کوچک در خواص سیال پایه‌ی آب (مانند پی اچ) است. همچنین محدوده‌ی خطای عمودی نمودارها برابر با ۴٪ لحاظ شده است.

شد (رابطه‌ی ۵) که در آن WXn محدوده‌ی خطای اندازه‌گیری پارامتر Xn است [۲۰-۲۲].

$$\sigma = \left(\frac{\sum (x - \bar{x})^2}{n} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

$$\% \frac{W}{x} = \left[\left(\frac{U_{x1}}{x1} \right)^2 + \left(\frac{U_{x2}}{x2} \right)^2 + \dots + \left(\frac{U_x}{x} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

$$W_x = \sqrt{\left(\frac{\partial x}{\partial x_1} w_{x1} \right)^2 + \left(\frac{\partial x}{\partial x_2} w_{x2} \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial x}{\partial x_n} w_x \right)^2} \quad (5)$$

به کمک روابط ۳-۵ برای این تحقیق، عدم قطعیت وسایل و تکرار آزمایش در جدول ۳ آمده است. همچنین نتایج حاکی از آن دارد که عدم قطعیت عدد پرانتل ۲/۳۳، عدد ناسلت ۴/۵، ضریب جابه‌جایی انتقال حرارت ۶/۷۸، ضریب اصطکاک ۵/۳۱ و توان پمپاژ تبادل‌گر گرمایی نیز کمتر از ۱۰ درصد است.

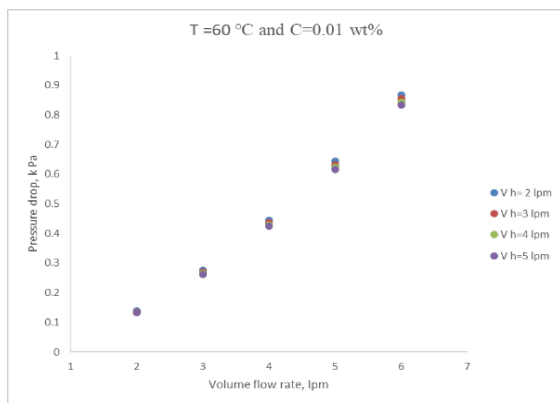
جدول ۳- عدم قطعیت وسیله و تکرار آزمایش

پارامترها	عدم قطعیت تکرار، (%)	عدم قطعیت وسیله، (%)
دمای هیبرید ورودی (°C)	۲/۵۷	۱/۱۸
دمای هیبرید خروجی (°C)	۱/۶۲	۲/۰۷
دمای آب ورودی (°C)	۵/۸۹	۴/۱۶
دمای آب خروجی (°C)	۲/۰۶	۲/۰۱۸
دبی هیبرید (Lit/s)	۳/۹۷	زمان = ۰/۲۳ s
اختلاف فشار سمت هیبرید (kPa)	۳/۵۶	حجم سیال = ۱/۴۲ Lit
	۲/۴۰	

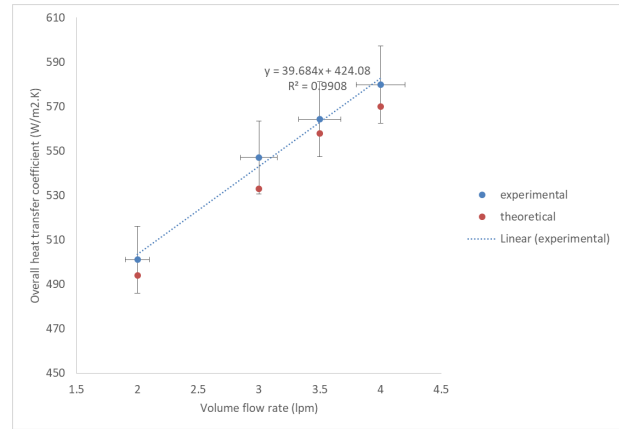
ثابت سیال سرد) و سیال سرد (دبی مشخص سیال گرم) باعث بهبود ضریب کلی انتقال حرارت نانوسیال می‌شود.

مشخص گردید که در یک دبی مشخص سیال گرم، مانند ۵ lpm افزایش دبی نانوسیال باعث بیشتر شدن ۴۳/۴٪ ضریب کلی انتقال حرارت شده است. همچنین در یک دبی مشخص نانوسیال (۶ lpm) با افزایش دبی سیال گرم، افزایش ۵۳/۴۷٪ ضریب کلی انتقال حرارت نانوسیال نتیجه می‌شود. دلیل این است که با افزایش دبی‌های حجمی، برخوردهای بین مولکولی نانوسیال بیشتر می‌شود که نتیجه‌ی آن افزایش عدد رینولدز و به تبع آن، عدد ناسلت و در نتیجه بیشتر شدن ضریب انتقال حرارت است که نتیجه‌ی مثبت به شمار می‌آید. بیشترین ضریب کلی انتقال حرارت ($1586 \text{ K} \cdot \text{W/m}^2$) مربوط به حالتی است که نانوسیال در دمای 24°C و دبی حجمی ۶ lpm از یک سمت صفحه‌ی تبادل گر در تماس با آب به عنوان سیال گرم در دمای 60°C و دبی حجمی ۵ lpm در طرف دیگر صفحه قرار بگیرد.

در تبادل گرهای حرارتی علاوه بر ضریب انتقال حرارت، افت فشار در تبادل گر نیز بسیار مهم است؛ در نتیجه برای این که مشخص گردد که افزایش دبی سیال گرم و سیال سرد چه تأثیری بر افت فشار نانوسیال دارد، شکل ۸ بررسی گردید.

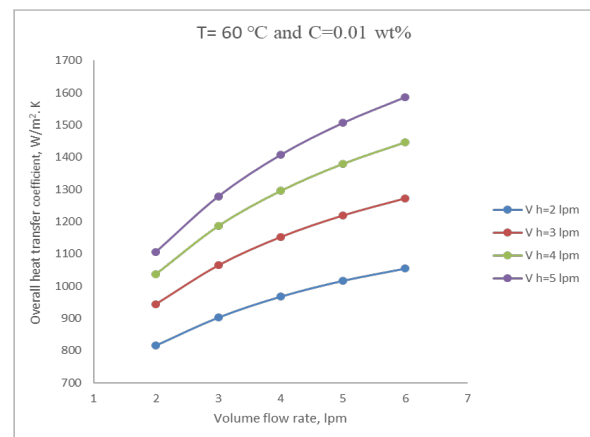


شکل ۸- اثر دبی سیال گرم و سرد بر افت فشار نانوسیال



شکل ۶- مقایسه‌ی نتایج به دست آمده برای تبادل گر با زاویه‌ی شورون ۴۵ درجه با روابط تئوری برای سیال پایه‌ی آب

برای مشخص شدن اثر دبی سیال گرم بر ضریب کلی انتقال حرارت و افت فشار، از تبادل گر گرمایی و نانوسیال -آب استفاده گردید. شکل ۷ اثر دبی سیال گرم بر ضریب کلی انتقال حرارت نانوسیال (سیال سرد) در دبی‌های مختلف بررسی شده است.



شکل ۷- اثر دبی‌های متفاوت سیال گرم بر ضریب کلی انتقال حرارت نانوسیال

برای این منظور، دمای المنت 60°C تنظیم شد. نانوسیال با درصد وزنی ۰/۰۱ و دبی‌های ۲-۶ lpm در تماس با سیال گرم با دبی‌های ۵-۲ lpm قرار گرفت. همان طور که در شکل ۷ نیز مشخص است، افزایش دبی سیال گرم (در دبی

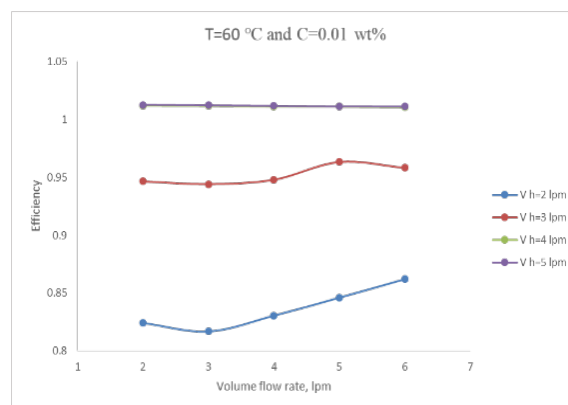
از شکل ۹ مشخص گردید که افزایش دبی سیال گرم در یک دبی مشخص نانوسیال باعث بهبود کارایی تبادل گر می‌گردد یا به عبارت دیگر، استفاده از نانوسیال-آب باعث بهبود کارایی تبادل گر نسبت به زمانی که تنها از آب-آب استفاده (دو سمت صفحه‌های تبادل گر آب است) می‌گردد، خواهد شد. به عنوان نمونه، برای دبی ثابت ۲ lpm از نانوسیال مشاهده گردید. افزایش دبی سیال گرم (آب) از ۲ به ۵ لیتر بر دقیقه باعث افزایش ۲۲/۹٪ کارایی تبادل گر می‌شود که مطلوب است. همچنین از شکل ۹ مشخص گردید که افزایش دبی نانوسیال نیز باعث بهبود کارایی تبادل گر می‌گردد (برای سیال گرم در دبی ثابت ۵ lpm، این میزان افزایش ۱۷/۳٪ است). بیشترین عملکرد مربوط به زمانی است که ۵ lpm آب به عنوان سیال گرم در دمای ۶۰ °C در یک سمت تبادل گر، در تماس با ۶ lpm نانوسیال در دمای ۲۴ °C در سمت دیگر تبادل گر باشد (۱/۰۲). همچنین مشخص گردید در دبی‌های پایین سیال گرم استفاده از نانوسیال نیز مطلوب نخواهد بود.

۴- نتیجه‌گیری

در کار حاضر، نانولوله‌ی کربنی چندجداره در سیال پایه‌ی آب در ۰/۰۱ wt% به کمک فعال‌کننده‌ی غلظت سطحی سدیم دودسیل سولفات پایدار گردید. جهت بررسی اثر دبی سیال گرم (آب) در دمای ثابت ۶۰ °C بر ضریب انتقال حرارت و افت فشار نانوسیال، از تبادل گر گرمایی صفحه‌ای واشردار که نانوسیال (روی صفحه‌های فرد) و آب (روی صفحه‌های زوج) در حال جریان هستند، استفاده گردید. دبی سیال گرم از ۲ تا ۵ لیتر بر دقیقه در تغییر است. نتایج نشان داد که افزایش دبی سیال گرم باعث افزایش ۵۰/۴۷٪ ضریب کلی انتقال حرارت و همچنین باعث کاهش افت فشار در سمت نانوسیال می‌گردد که هر دو

شکل ۸ نمودار تغییر افت فشار نانوسیال که با اندازه‌گیری از بستر آزمایشگاهی به دست آمده رسم شده است. همان‌طور که مشخص است، افزایش دبی نانوسیال باعث افزایش افت فشار می‌گردد که مطلوب نیست (برای ۲ lpm سیال گرم، افزایش دبی نانوسیال باعث افزایش ۵۳۰/۳۳٪ افت فشار در تبادل گر می‌گردد)، ولی افزایش دبی سیال گرم باعث کاهش افت فشار در تبادل گر می‌گردد (در یک دبی مشخص نانوسیال (۶ lpm) افزایش دبی سیال گرم از ۲ به ۵ لیتر بر دقیقه باعث بهبودی ۳۹۶/۵۰٪ می‌گردد) که بسیار مطلوب است و در انتخاب سایز پمپ مؤثر خواهد بود. دلیل این است که با افزایش دبی سیال گرم، اختلاف دمای ورود و خروج سیال سرد بیشتر می‌شود که این باعث کاهش ویسکوزیته می‌گردد که باعث کاهش افت فشار می‌شود؛ درحالی‌که با افزایش دبی نانوسیال، میزان عدد رینولدز بیشتر شده که نتیجه‌ی آن کاهش ضریب اصطکاک فانیگ و افزایش افت فشار نانوسیال است.

همان‌طور که از شکل‌های ۷ و ۸ مشخص گردید، افزایش دبی سیال گرم (آب) باعث بهبود انتقال حرارت نانوسیال و افت فشار در سمت نانوسیال می‌گردد که همیشه در تبادل گرهای حرارتی مطلوب است. برای اینکه مشخص گردد که استفاده از نانوسیال به جای سیستم آب-آب، چه تأثیری بر کارایی یا عملکرد تبادل گر دارد، (شکل ۹) بررسی‌ها ادامه یافت.



شکل ۹- اثر دبی سیال گرم بر کارایی تبادل گر

۶- منابع و مراجع

- [1] Giwa, S. O., Sharifpur, M., Goodarzi, M., Alsulami, H., & Meyer, J. P. (2021). Influence of base fluid, temperature, and concentration on the thermophysical properties of hybrid nanofluids of alumina-ferrofluid: experimental data, modeling through enhanced ANN, ANFIS, and curve fitting. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 143(6), 4149-4167.
- [2] Das, P. K. (2017). A review based on the effect and mechanism of thermal conductivity of normal nanofluids and hybrid nanofluids. *Journal of Molecular Liquids*, 240, 420-446.
- [3] Ali, N., Teixeira, J. A., & Addali, A. (2018). A review on nanofluids: fabrication, stability, and thermophysical properties. *Journal of Nanomaterials*, 2018.
- [4] Naddaf, A., & Heris, S. Z. (2018). Experimental study on thermal conductivity and electrical conductivity of diesel oil-based nanofluids of graphene nanoplatelets and carbon nanotubes. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 95, 116-122.
- [5] Shanbedi, M., Amiri, A., Zeinali Heris, S., Eshghi, H., & Yarmand, H. (2018). Effect of magnetic field on thermo-physical and hydrodynamic properties of different metals-decorated multi-walled carbon nanotubes-based water coolants in a closed conduit. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 131(2), 1089-1106.
- [6] Ramezani Azghandi, O., Maghrebi, M. J., & Teymourash, A. R. (2016). Modification of Glucose biosensor using Pt/MWCNTs electrode and optimization by application of taguchi method. *International Journal of Nano Dimension*, 7(3), 231-239.

نتیجه، مطلوب در تبادل گرهای حرارتی است. همچنین برای اینکه مشخص گردد اثر نانوسیال نسبت به زمانی که از نانوسیال استفاده نشده است (آب-آب) چه میزان است، عملکرد نانوسیال بر تبادل گر گرمایی صفحه‌ای واشردار ۱۳ صفحه‌ای بررسی گردید و مشخص شد افزایش دبی سیال گرم باعث بهبود ۲۲/۹٪ می‌گردد که نشان می‌دهد تهیه‌ی نانوسیال به کمک فعال‌کننده‌ی سطحی سدیم دودسیل سولفات و روش بیان‌شده (حاوی نانولوله‌ی کربنی در سیال پایه آب) در مباحثی که هدف میزان بهبود انتقال حرارت است، مطلوب خواهد بود. همچنین افزایش دبی نانوسیال نیز بررسی گردید که نشان‌دهنده‌ی بهبود عملکرد می‌گردد.

۵- فهرست علائم

D_p	قطر دهانه و پورت ورودی لوله، m
h	ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی، $K.W/m^2$
L_p	فاصله‌ی مرکز تا مرکز طولی، m
L_w	فاصله‌ی مرکز تا مرکز عرضی، m
N_p	تعداد پاس‌ها یا گذرهای صفحه‌های تبادل گر
MWCNTs	نانولوله‌ی کربنی چندجداره
W	قدرت پمپ
	علائم یونانی
ρ	چگالی، kg/m^3
μ	گرانروی، cp
	زیرنویس
b	سیال پایه (سیال آب)
nf	نانوسیال (سیال سرد)
w	سیال آب (سیال گرم)

Using Taguchi Method. Amirkabir journals of Mechanical Engineering, 3(54),8-30 (in Persian).

[14] Ramezani Azghandi, O., Maghrebi, M. J., & Teymourtash, A. R. (2021). The Effect of Plate Numbers on Optimal Condition of Gasket Heat Exchanger by Graphene-Carbon Nanotube Hybrid. Journal of Solid and Fluid Mechanics, 5(11), 149-163 (in Persian).

[15] Goodarzi, M., Amiri, A., Goodarzi, M. S., Safaei, M. R., Karimipour, A., Languri, E. M., & Dahari, M. (2015). Investigation of heat transfer and pressure drop of a counter flow corrugated plate heat exchanger using MWCNT based nanofluids. International communications in heat and mass transfer, 66, 172-179.

[16] Shanbedi, M., Amiri, A., Zeinali Heris, S., Eshghi, H., & Yarmand, H. (2018). Effect of magnetic field on thermo-physical and hydrodynamic properties of different metals-decorated multi-walled carbon nanotubes-based water coolants in a closed conduit. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 131(2), 1089-1106.

[17] Amiri, A., Maghrebi, M., Baniadam, M., & Heris, S. Z. (2011). One-pot, efficient functionalization of multi-walled carbon nanotubes with diamines by microwave method. Applied Surface Science, 257(23), 10261-10266.

[18] Amiri, A., Shanbedi, M., Eshghi, H., Heris, S. Z., & Baniadam, M. (2012). Highly dispersed multiwalled carbon nanotubes decorated with Ag nanoparticles in water and experimental investigation of the thermophysical properties. The Journal of Physical Chemistry C, 116(5), 3369-3375.

[19] Amiri, A., Sadri, R., Shanbedi, M., Ahmadi, G., Kazi, S. N., Chew, B. T., & Zubir, M. N. M. (2015). Synthesis of ethylene glycol-treated graphene

[7] Ramezani Azghandi, O., Maghrebi, M. J., & Teymourtash, A. R. (2021). Investigation and optimization of heat transfer coefficient of MWCNTs-Waternanofluids in a plate heat exchanger. International Journal of Nano Dimension, 12(2), 104-112.

[8] Xian, H. W., Sidik, N. A. C., & Saidur, R. (2020). Impact of different surfactants and ultrasonication time on the stability and thermophysical properties of hybrid nanofluids. International Communications in Heat and Mass Transfer, 110, 104389.

[9] Moradi, M., Abouchenari, A., Pudine, M., & Sharifianjazi, F. (2021). The effect of polymeric surfactant content on the mechanical properties of Al/GNP nanocomposites. Materials Chemistry and Physics, 257, 123831.

[10] Bhattad, A., Sarkar, J., & Ghosh, P. (2018). Discrete phase numerical model and experimental study of hybrid nanofluid heat transfer and pressure drop in plate heat exchanger. International Communications in Heat and Mass Transfer, 91, 262-273.

[11] Demirkır, Ç., & Ertürk, H. (2021). Convective heat transfer and pressure drop characteristics of graphene-water nanofluids in transitional flow. International Communications in Heat and Mass Transfer, 121, 105092.

[12] Ramezani Azghandi, O., Maghrebi, M. J., & Teymourtash, A. R. (2021). Experimental investigation of forced convection heat transfer and pressure drop of GNP-MWCNTs hybrid in a plate heat exchanger with different plate chevron. Nanomaterials, 47(13), 184-194 (in Persian).

[13] Ramezani Azghandi, O., Maghrebi, M. J., & Teymourtash, A. R. (2022). Experimental Study of the Effect of Flow Rate and Concentration of Graphene-Water Nanofluid and Finding the Optimal Conditions

Esfahani, J. (2019). Experimental study on thermal analysis of a novel shell and tube heat exchanger with corrugated tubes. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 138(2), 1583-1606.

[22] Demirkır, Ç., & Ertürk, H. (2021). Convective heat transfer and pressure drop characteristics of graphene-water nanofluids in transitional flow. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 121, 105092.

nanoplatelets with one-pot, microwave-assisted functionalization for use as a high performance engine coolant. *Energy conversion and management*, 101, 767-777.

[20] Tiwari, A. K., Ghosh, P., & Sarkar, J. (2013). Performance comparison of the plate heat exchanger using different nanofluids. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 49, 141-151.

[21] Milani Shirvan, K., Mamourian, M., & Abolfazli

مطالعه‌ی عددی و بررسی تأثیر میدان مغناطیسی بر سرعت و افت فشار سیال هیدرودینامیک مغناطیسی در بلنکت

مبین غفاری شاد^۱، مصطفی والی‌زاده اردلان^۲، علی جوادی^{۳*}

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد؛ دانشکده‌ی مهندسی، گروه مکانیک، دانشگاه برگامو، برگامو، ایتالیا.

۲- دکترای تخصصی؛ دانشکده‌ی مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران.

۳- دکترای تخصصی؛ دانشکده‌ی مهندسی، گروه مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

چکیده

پژوهش حاضر به مطالعه‌ی عددی یک رآکتور گداخت هسته‌ای و اهمیت سرعت سیال هیدرودینامیک مغناطیسی در فرآیند هم‌جوشی هسته‌ای پرداخته است. در رآکتورهای گداخت هسته‌ای سیال توسط یک لایه جداکننده، از بدنه‌ی اصلی بلنکت فاصله می‌گیرد. ساختار جداکننده از دو جهت حائز اهمیت فراوان است. این ساختار در اولویت اول به‌عنوان عایق حرارتی عمل می‌کند. در اولویت دوم از جداکننده برای تنظیم فشار استفاده می‌شود. موضوعاتی که در این پژوهش برای بررسی انتخاب شده‌اند عبارتند از: تأثیر شدت میدان مغناطیسی، پروفیل و ابعاد سطح مقطع بلنکت و ضخامت دیواره‌ها بر سرعت جریان و افت فشار سیال هیدرودینامیک مغناطیسی. همچنین پروفیل تغییرات سرعت جریان تحت تأثیر شدت میدان مغناطیسی به‌منظور انتخاب بهترین سطح مقطع ممکن برای بلنکت در طول کانال رسم شده است. نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهند که سرعت ماکزیمم در بلنکت با سطح مقطع مستطیلی در میدان ۱ تسلا، ۱۱ درصد و در میدان ۴ تسلا، ۹ درصد بیشتر از بلنکت با سطح مقطع مربع است. همچنین افزایش شدت میدان مغناطیسی از ۱ تسلا به ۴ تسلا باعث افزایش ۹ برابری افت فشار در بلنکت با سطح مقطع مربع و افزایش ۱۲ برابری افت فشار در بلنکت با سطح مقطع مستطیل می‌شود.

کلمات کلیدی

سیال هیدرودینامیک مغناطیسی، بلنکت، افت فشار، میدان مغناطیسی، مطالعه‌ی عددی، هم‌جوشی هسته‌ای

Numerical study of the effect of magnetic field on velocity and pressure drop of magneto hydrodynamic fluid in blanket**Mobin Ghafari Shad¹, Mostafa Valizadeh Ardalan², Ali Javadi^{3*}**

1- Department of Mechanical Engineering, University of Bergamo, Bergamo, Italy.

2- Department of Mechanical Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran.

3- Department of Mechanical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

Abstract

The present study investigates the structure of a nuclear fusion reactor and the importance of magnetic hydrodynamic fluid. In reactors, the fluid is separated from the main body of the blanket by a separating layer. The separating structure is important in two ways. This structure primarily acts as a thermal insulator. The second priority is used for the separator to adjust the pressure and reduce it. The topics selected in this study are: the effect of magnetic field strength, profiles and dimensions of a blanket, wall thickness, flow velocity and pressure drop, as well as the profile of flow velocity changes due to magnetic field strength. The results show that the maximum velocity in blanket with rectangular cross section in 1T field is 11% and in 4T field is 9% faster than blanket with square cross section. Also, increasing the magnitude of the magnetic field from 1T to 4T causes a 9-fold increase in pressure drop in the blanket with a square cross-section and an 11-fold increase in the pressure drop in the blanket with a rectangular cross-section.

Keywords

Magneto hydrodynamics, Blanket, Pressure drop, Magnetic field, Numerical study, Nuclear fusion

۱- مقدمه

به بررسی رفتار دینامیکی سیال رسانا که تحت تأثیر میدان مغناطیسی قرار گرفته، هیدرودینامیک مغناطیسی^۱ می‌گویند. امروزه هیدرودینامیک مغناطیسی بخش مهمی از صنایع دفاعی، نظامی، تجهیزات هوافضا و رآکتورهای هم‌جوشی هسته‌ای است. به رآکتورهای هم‌جوشی هسته‌ای، توکامک گفته می‌شود. بلنکت^۲ یکی از مهم‌ترین قسمت‌های یک توکامک است که وظیفه‌ی تولید سوخت، انتقال انرژی و محافظت از سایر قسمت‌های توکامک در برابر تشعشعات شدید را دارد. برای دستیابی به هم‌جوشی هسته‌ای، یک میدان قوی مغناطیسی مورد نیاز است. به همین دلیل بلنکت‌ها همواره در معرض شدیدترین میدان‌های مغناطیسی هستند. منظور از هم‌جوشی هسته‌ای، پیوند بین ایزوتوپ هیدروژن (دوتریوم و تریتیوم) است. ایترا^۳ در حال حاضر بزرگ‌ترین رآکتور هم‌جوشی است. سیال استفاده‌شده در این پروژه بین‌المللی فلز مایع سرب-لیتیم^۴ ۱۷۴ است. اهمیت این سیال توانایی بالای آن در انتقال حرارت و ظرفیت بالای آن برای تولید تریتیوم است. مهم‌ترین موضوعاتی که محققین در رابطه با این سیال بررسی می‌کنند افت فشار سیال، سرعت جریان آن و میزان انتقال حرارت است [۱].

اگرچه هنوز هم محققین نتوانسته‌اند نتایج پژوهش‌های خودشان را به‌صورت عملی اجرا کنند، اما بشر به

یافته‌های بسیار مهمی در رابطه با هم‌جوشی هسته‌ای و هیدرودینامیک مغناطیسی دست یافته است. تحقیقات روی هم‌جوشی هسته‌ای از قرن ۲۰ میلادی شروع شدند. تحقیقات در این زمینه با پژوهش کیم^۵ و همکارانش [۲] روی سرعت سیال هیدرودینامیک مغناطیسی شروع آغاز شد. کمی بعدتر وانگ^۶ و همکارانش [۳] مطالعاتی درباره‌ی جنس ماده‌ی جداکننده و تأثیر آن بر افت فشار انجام دادند. در سال ۲۰۰۹، استارک^۷ [۴] تأثیر سیال هیدرودینامیک مغناطیسی را به‌صورت عملی در رآکتور پروژه‌ی بین‌المللی ایترا بررسی کرد. در سال ۲۰۱۳ لی^۸ و همکاران [۵] به بررسی عددی افت فشار سیال در کانالی با سطح مقطع دایره پرداختند. آن‌ها دریافتند که تغییر سطح مقطع ورودی کانال راندمان هم‌جوشی را تا ۳۵ درصد کاهش می‌دهد. در سال ۲۰۱۷، فرناندز^۹ از طرف یک مؤسسه‌ی پژوهش‌های بین‌المللی [۶]، تأثیر استفاده از خنک‌کننده‌ی گازی هلیومی بر دمای بدنه را بررسی کرد. او متوجه شد که اگر از ۳ داکت گاز هلیوم در سطح مقطع ورودی کانال استفاده شود، دمای بدنه به‌شدت کاهش می‌یابد. در سال ۲۰۱۹، یوان ما^{۱۰} و همکارانش [۷] تأثیر ضخامت لایه‌ی هارتمن بر شدت انتقال حرارت از بدنه را بررسی کردند و با بررسی معادله‌ی استفان-بولتزمن^{۱۱}، به نتایج مهمی دست یافتند. کمی بعدتر در سال ۲۰۱۹، هولین و همکارانش [۸] ساختار بدنه‌ی جداکننده را با مواد نانو پوشش دادند و میزان افت فشار

۱- Magneto hydrodynamic

۲- Blanket

۳- ITER

۴- Pb_Li17

۵- Kim

۶- Wang

۷- Starke

۸- Lee

۹- Fernández

۱۰- Yuan Ma

۱۱- Stefan Boltzmann

آنجایی که نیروگاه‌های شکافت هسته‌ای مشکلات زیادی، از جمله زباله‌های هسته‌ای و خطر همیشگی انفجار را دارند، محققین در تلاش برای دستیابی به واکنش هم‌جوشی هسته‌ای هستند. با توجه به این دو حقیقت که با گذشت نزدیک به نیم قرن، هنوز بشر نتوانسته به صورت عملی به هم‌جوشی هسته‌ای دست یابد و همچنین تحقیقات زیادی در این زمینه در جوامع علمی ایران صورت نگرفته است، این موضوع برای پژوهش انتخاب شده است. در این پژوهش، تغییر سطح مقطع کانال بلنکت از مربع به مستطیل بررسی شده است. همچنین تأثیر شدت میدان مغناطیسی بر سرعت سیال و مقدار افت فشار نیز مورد بررسی قرار گرفته‌اند. در این پژوهش، به صورت ویژه و برای اولین بار، به تأثیر شدت میدان مغناطیسی بر افت فشار سیال، به عنوان یک عامل کنترلی در نظر گرفته شده است.

۲- مدل سازی کانال بلنکت

در شکل ۱، یک کانال با سطح مقطع مربع و در شکل ۲، یک کانال با سطح مقطع مستطیل در نظر گرفته شده است. ابعاد سطح مقطع کانال شکل ۱، 25×25 میلی‌متر و در جهت جریان سیال، ۵۰۰ میلی‌متر است. ابعاد سطح مقطع کانال شکل ۲، 25×50 میلی‌متر است و طول کانال مشابه شکل ۱، ۵۰۰ میلی‌متر است.

میدان مغناطیسی B در جهت محور Y به کانال اعمال می‌شود. فلز مذاب سرب-لیتیوم ۱۷ نیز در جهت محور Z حرکت می‌کند. دیواره‌های خارجی کانال عایق هستند. رفتار سیال از جهت افت فشار و تغییرات سرعت، در میدان‌های ۱ تسلا و ۴ تسلا مورد بررسی قرار گرفته است.

را بررسی کردند. طبق نتایج آن‌ها، میزان افت فشار با این کار به شدت کاهش یافت. در سال ۲۰۲۰، سوتو^۱ و همکارانش [۹] تأثیر میزان زبری بدنه‌ی جداکننده بر افت فشار را بررسی کردند. طبق نتایج گزارش شده استفاده از یک جداکننده با سطحی متخلخل افت فشار را تا ۱۲ درصد افزایش می‌دهد. نتایج آخرین تحقیقات در سال ۲۰۲۱ نشان می‌دهد که اگر بدنه‌ی اصلی بلنکت از جنس فولاد ضدزنگ مارتنزیتی ساخته شود، میزان ناپایداری سیال هیدرودینامیک مغناطیسی در حالت پلاسما افزایش یافته و در نتیجه رسیدن به واکنش هم‌جوشی هسته‌ای در مدت زمان کوتاه‌تری امکان‌پذیر می‌شود [۱۰]. از سمتی دیگر، انتقال حرارت از داخل بلنکت به پوسته‌ی بیرونی یکی از مشکلات عمده در مسیر دستیابی به هم‌جوشی هسته‌ای است. به همین دلیل در سال ۲۰۲۱، گروهی از محققان تصمیم گرفتند تا با تغییر جنس بدنه‌ی بلنکت از فولاد مارتنزیتی به آلیاژ کاربید سیلیسیم^۲، میزان حرارت خروجی از بلنکت را کاهش دهند. اگرچه استفاده از آلیاژ کاربید سیلیسیم باعث کاهش ۲۳ درصدی میزان انتقال حرارت از بلنکت به پوسته شد، ولی افت فشار شدید سیال هیدرودینامیک مغناطیسی مانع از عملی شدن این ایده شد [۱۱]. طی آخرین تحقیقات، گروهی از دانشمندان تلاش کردند تا با استفاده از لیتیم به عنوان ماده‌ی خنک‌کننده، میزان دمای پوسته بیرونی را کاهش دهند، اما نتایج نشان می‌دهد که گاز هلیوم بهترین خنک‌کننده‌ی ممکن برای استفاده در رآکتورهای هم‌جوشی هسته‌ای است [۱۲].

با توجه به افزایش روزافزون جمعیت جهان و روبه‌پایان بودن سوخت‌های فسیلی، دانشمندان سال‌هاست که به دنبال یافتن یک منبع انرژی پاک و بی‌خطر هستند. از

۱- Soto

۲- Silicon Carbide

در نظر گرفتن فرضیات بالا، سایر معادلات حاکم بر سیال مگنتوهیدرودینامیک از روابط زیر به دست می‌آیند [۱۳]:

$$\rho \vec{V} \cdot \nabla \vec{V} = -\nabla P + \mu \nabla^2 \vec{V} + \vec{J} + \vec{B}$$

$$(\nabla \cdot \vec{J}) = 0 \quad (\nabla \cdot \vec{u}) = 0$$

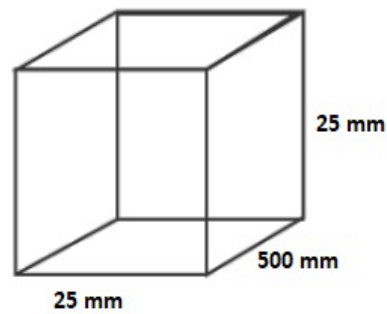
$$\vec{J} = -\sigma(-\nabla \varphi + \vec{U} \times \vec{B})$$

$$(\vec{U} \cdot \nabla) \vec{U} = -\frac{\nabla P}{\rho} + \nu \nabla^2 \vec{U} + \frac{\vec{J} \times \vec{B}}{\rho}$$

$$H_a = LB_0 \sqrt{\frac{\sigma}{\rho \nu}}$$

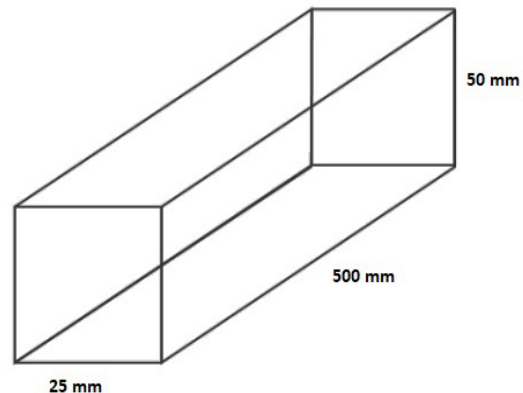
$$\rho C_p (\vec{V} \cdot \nabla T) = K (\nabla^2 T) + \frac{J^2}{\sigma} + Q_n$$

در روابط بالا، متغیرهای $\vec{J}$ ، φ و $\vec{u}$ به ترتیب بردار چگالی جریان، پتانسیل الکتریکی و بردار سرعت سیال می‌باشند. معادلات ۲ تا ۸ به ترتیب معادلات ناویر استوکس، پیوستگی، پایداری جریان، قانون اهم، مومنتوم، هارتمن و انرژی می‌باشند. جهت بررسی صحت نتایج، تمامی نتایج به دست آمده از حل عددی معادلات با نتایج مرجع [۱۴] مقایسه شده و در شکل‌های ۵ تا ۸ قابل رؤیت می‌باشند. برای شبیه‌سازی کامپیوتری معادلات، از نرم‌افزار انسیس فلوئنت ۲۰ استفاده شده است. از روش سیمپل برای حل مسئله و به دست آمدن رابطه‌ی فشار-سرعت استفاده شده است. همچنین جهت هم‌گرایی نتایج، معیار هم‌گرایی در تمامی معادلات ۶-۱۰ در نظر گرفته شده است.



شکل ۱. کانال با سطح مقطع مربع.

Channel with square cross section. ۱ Figure



شکل ۲. کانال با سطح مقطع مستطیل.

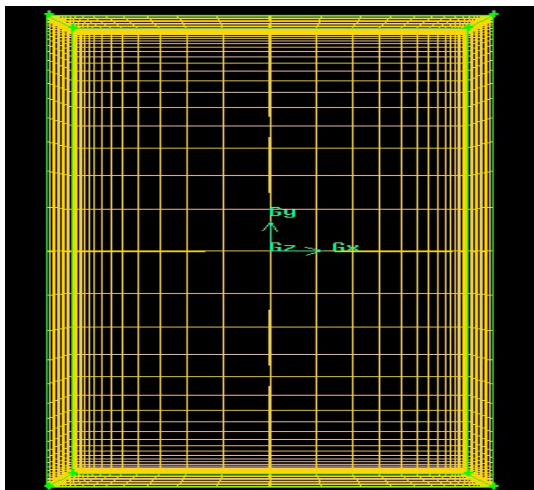
Channel with rectangle cross section. ۲ Figure

۳- معادلات حاکم بر مساله

خواص سیال سرب-لیتیوم ۱۷ ثابت در نظر گرفته شده است. مقدار رینولدز مغناطیسی کوچک‌تر از یک است و مقدار آن از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید:

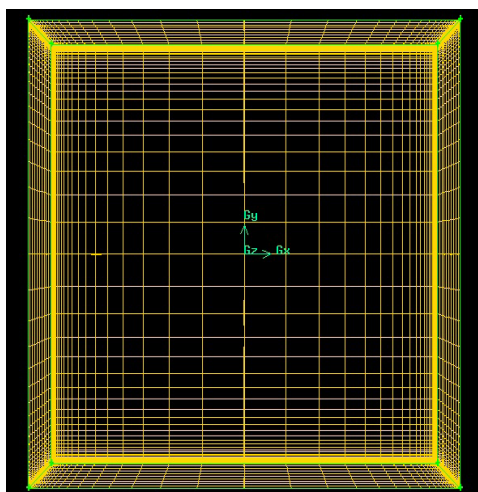
$$R_m = \mu_0 \sigma u L$$

که در آن $\mu_0 = \frac{1}{256} \times 10^{-6} \text{ (H/m)}$ هدایت الکتریکی سیال و L طول مشخصه می‌باشد. با u سرعت سیال، σ هدایت الکتریکی سیال و L طول مشخصه می‌باشد. با



شکل ۳. شبکه‌بندی کانال با سطح مقطع مستطیل.

Figure 3. Channel mesh with rectangle cross section



شکل ۴. شبکه‌بندی کانال با سطح مقطع مربع.

Figure 4. Channel mesh with square cross section

طبق نتایج، استفاده از این شبکه‌بندی درصد خطا را بسیار کاهش می‌دهد. استفاده از شبکه‌ای با تعداد گرهی کمتر باعث کاهش دقت نتایج می‌شود. همچنین استفاده از شبکه با تعداد گرهی بالاتر، باعث ایجاد تغییرات ناچیزی می‌شود و فقط زمان محاسبات را به شدت افزایش می‌دهد. به همین دلیل از شبکه‌ای با تعداد گره ۱۲۰۰۰۰۰ استفاده شده است. نتایج به دست آمده از حل عددی و بررسی

۴- شرایط مرزی

سرعت ورودی در تمامی حالت‌ها 0.1 m/s بوده است و به عنوان شرط مرزی سرعت ورودی^۱ تعریف شده است. یک شرط مرزی فشار خروجی^۲ برای تنظیم فشار در خروجی کانال در 0 Atm اسفاده شده است. در تمام سطوح دیواره داخلی، شرایط مرزی بدون لغزش اعمال شده است. سطوح خارجی و دیواره‌ها به عنوان سطوح عایق مدل‌سازی شده‌اند تا اطمینان حاصل شود که هیچ جریان الکتریکی‌ای از این مرزها عبور نمی‌کند.

شرط مرزی ورودی:

$$u = v = 0, \quad w = w_0, \quad P_{in} = P_0 \quad (6)$$

شرط مرزی خروجی:

$$u = v = \frac{\partial w}{\partial n} = 0, \quad \varphi_{out} = 0, \quad P_{out} = 0 \quad (7)$$

۵- بررسی نتایج

۵-۱- استقلال از شبکه و اعتبارسنجی نتایج

همان‌طور که در شکل‌های ۳ و ۴ مشخص است، از یک شبکه‌بندی متشکل از ۷۰ گره در جهت x ، ۷۰ گره در جهت y و ۲۴۵ گره در جهت z است.

۱- velocity inlet

۲- pressure outlet

استقلال از شبکه در جدول‌های ۱ تا ۴ رؤیت می‌شوند. سیدورنکو و شیشکو [۱۴] در شکل‌های ۵ تا ۸ مقایسه همچنین هر سه شبکه‌بندی مورد استفاده در جدول ۶ شده است. بررسی و مقایسه‌ی نتایج نشان می‌دهد که قابل‌رؤیت هستند. جهت بررسی اعتبار نتایج به‌دست‌آمده میزان خطا کمتر از ۶ درصد است. به‌همین دلیل می‌توان از حل عددی، سرعت در مقطع خروجی کانال با نتایج به صحت نتایج حل عددی در این پژوهش اعتماد کرد.

جدول ۱. بررسی استقلال از شبکه در کانال با سطح مقطع مربع در میدان ۴ تسلا

Table ۱. Mesh independency results in square duct in ۴T

درصد خطا	افت فشار	درصد خطا	سرعت ماکزیمم	تعداد سلول‌های شبکه
-	۲۶۷/۳۱۵۴	-	۰.۵۷۳۲۶۴۷۵/۰	۸۵۷۰۹۲
۳۸۹۸۷۳۴۶۳/۵	۲۵۶/۲۹۸۴	۷۸۹۱۴۵۸۵۳/۶	۰.۶۱۲۱۸۴۵۳/۰	۱۲۰۰۰۰۰
۴۴۲۲۲۰۷۷۵/۰	۴۵۳/۲۹۹۷	۳۸۰۱۶۱۵۱۸/۰	۰.۶۰۹۸۵۷۲۴/۰	۲۲۰۰۰۰۰

جدول ۲. نتایج استقلال از شبکه در کانال با سطح مقطع مربع در میدان ۱ تسلا

Table ۲. Mesh independency results in square duct at ۱T

درصد خطا	افت فشار	درصد خطا	سرعت ماکزیمم	تعداد سلول‌های شبکه
-	۸۸۴۳/۳۶۵	-	۰.۲۸۲۴۵۵۵۲/۰	۸۵۷۰۹۲
۷۰۶۸۳۶۰۱۳/۶	۳۴۵/۳۴۱	۴۲۷۸۹۵۳۳۷/۵	۰.۲۹۷۷۸۶۹۱/۰	۱۲۰۰۰۰۰
۵۱۴۱۰۱۵۰۹/۰	۰.۹۹۹/۳۴۳	۳۴۲۴۲۲۷۰۸/۰	۰.۲۹۶۷۶۷۲۲/۰	۲۲۰۰۰۰۰

جدول ۳. نتایج استقلال از شبکه در کانال با سطح مقطع مستطیل در میدان ۴ تسلا

Table ۳. Mesh independency results in rectangle duct at ۴T

درصد خطا	افت فشار	درصد خطا	سرعت ماکزیمم	تعداد سلول‌های شبکه
-	۴۹۲/۶۸۲۵	-	۰.۶۳۸۱۴۷۲۵/۰	۸۵۷۰۹۲
۷۰۰۱۴۴۶۹۳/۴	۶۸۴/۶۵۰۴	۱۴۰۱۲۲۴۴/۵	۰.۶۷۰۹۴۸۸/۰	۱۲۰۰۰۰۰
۵۰۵۲۳۵۹۱۹/۰	۵۴۸/۶۵۳۷	۵۲۲۱۷۰۹۹۱/۰	۰.۶۷۴۴۵۲۳/۰	۲۲۰۰۰۰۰

جدول ۴. نتایج استقلال از شبکه در کانال با سطح مقطع مستطیل در میدان ۱ تسلا
4T Mesh independency results in rectangle duct at 1T

درصد خطا	افت فشار	درصد خطا	سرعت ماکزیمم	تعداد سلول های شبکه
-	۵۲۹/۵۷۴	-	۰۳۱۵۴۸۴۲۶/۰	۸۵۷۰۹۲
۹۴۵۴۴۲۶۷/۴	۱۱۶/۵۴۶	۶۰۰۰۵۸۳۳۶/۴	۰۳۲۹۹۹۷۲/۰	۱۲۰۰۰۰۰
۵۱۷۶۵۵۵۹/۰	۹۴۳/۵۴۸	۷۵۱۲۷۴۱۳۴/۰	۰۳۳۲۴۷۵۹/۰	۲۲۰۰۰۰۰

به منظور بالا بردن دقت نتایج به دست آمده طبق مطالعات انجام شده [۱۵]، باید تعداد گره در لایه های هارتمن^۱ ۵ و در لایه های دیوار جانبی^۲ ۷ عدد باشد. عدد هارتمن، ضخامت لایه های هارتمن و ضخامت لایه های جانبی از روابط زیر به دست می آیند [۱۶]:

$$\delta_{Hartmann} \sim Ha^{-1} \quad (9)$$

$$\delta_{Side\ wall} \sim Ha^{-\frac{1}{2}} \quad (10)$$

$$Ha = LB \sqrt{\frac{\sigma}{\rho \nu}}, \quad Re = \frac{UL}{\nu} \quad (11)$$

همچنین جهت به دست آوردن تعداد گره ها و ضخامت لایه های هارتمن و لایه های جانبی از روابط ۹ و ۱۰ استفاده شده است. به دیوارهای عمود بر میدان مغناطیسی، لایه های هارتمن و به دیوارهای موازی با میدان لایه های کناری یا دیواره های جانبی گفته می شود. ضخامت لایه های هارتمن و دیواره های جانبی بر حسب متر و نسبت مش هارتمن و دیواره های جانبی در جدول ۵ مشاهده می شوند.

جدول ۵. محاسبات ضخامت لایه های مرزی.

Table 5. Thickness of boundary layer calculations

سطح مقطع	ضخامت هارتمن	ضخامت دیواره های جانبی	نسبت مش هارتمن	نسبت مش دیواره های جانبی
مربع	۰۰۳۸۴/۰	۰۶۲۰۱/۰	۲۷۸۷/۱	۸۲۱۵/۱
مستطیل	۰۰۱۹/۰	۰۴۳۸/۰	۳۱/۱	۲۳/۱

۱- Hartmann

۲- side wall

جدول ۶. تعداد سلول‌های شبکه.

Table ۶. Cell numbers.			
شماره‌ی شبکه	شبکه ۱	شبکه ۲	شبکه ۳
تعداد سلول‌های شبکه	۸۵۷۰۹۲	۱۲۰۰۰۰	۲۲۰۰۰۰

۵-۲- نتایج حل عددی

طبق قوانین فیزیک، اگر به یک جریان الکتریکی القایی، یک میدان مغناطیسی خارجی اعمال شود، ذرات در جهت چرخش انگشتان دست حرکت خواهند کرد؛ از همین قانون، برای کنترل مسیر حرکت سیال مگنتوهیدرودینامیک استفاده می‌شود. اثر متقابل جریان القایی و میدان مغناطیسی اعمال شده باعث ایجاد نیروی لورنتز^۱ می‌شود. نیروی لورنتز باعث افزایش افت فشار می‌شود. به همین دلیل پروفیل سرعت در مرکز کانال کاهش یافته و یک‌نواخت می‌شود. در تمام محاسبات انجام شده، سرعت ورودی m/s ۰/۰۱ می‌باشد. همچنین کانال‌ها از جنس فولاد ضدزنگ و فلز مایع خنک کننده سرب-لیتیم ۱۷ می‌باشد. لازم به ذکر است که خواص فیزیکی هر دو ماده به ترتیب در جدول‌های ۷ و ۸ ذکر شده است.

جدول ۷. خواص فیزیکی فولاد [۱۲].

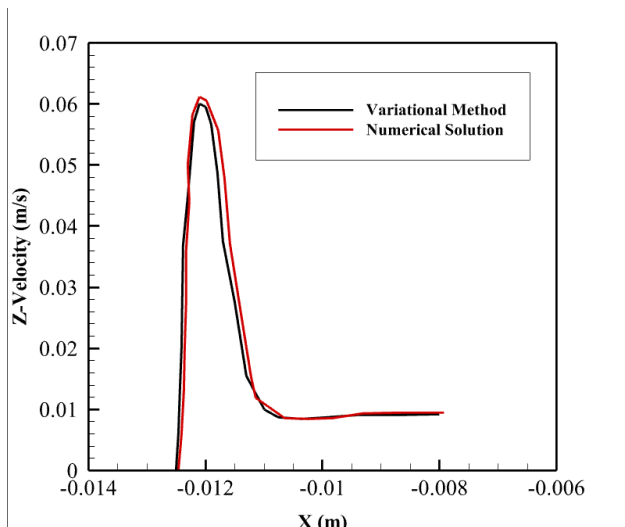
Table ۷. Physical characteristics of Steel [۱۲].

جنس	ضریب هدایت الکتریکی (s/m)
فولاد	$1/01 \times 10^6$

جدول ۸. خواص فیزیکی سرب-لیتیم [۱۳].

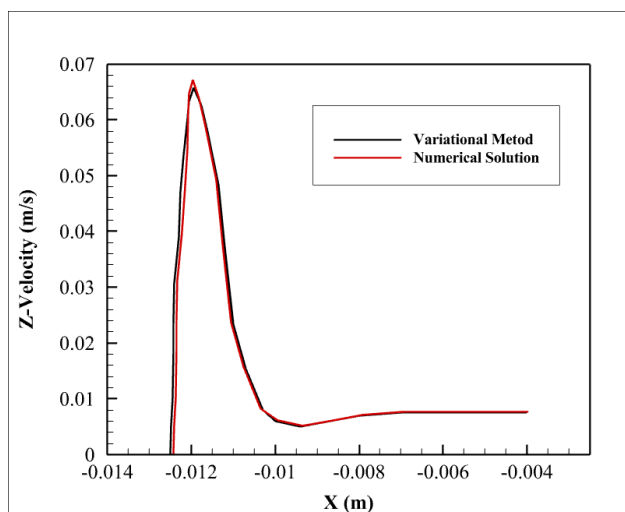
Table ۸. Physical characteristics of PbLi [۱۳].

جنس	ضریب هدایت الکتریکی (s/m)	چگالی (s/m^3)	ویسکوزیته‌ی مغناطیسی (Pa.s)	نفوذپذیری مغناطیسی (۱-H.m)
PbLi۱۷	۷۶۱۶/۷	۹	۰۰۱۸/۰	۲۵۷/۱



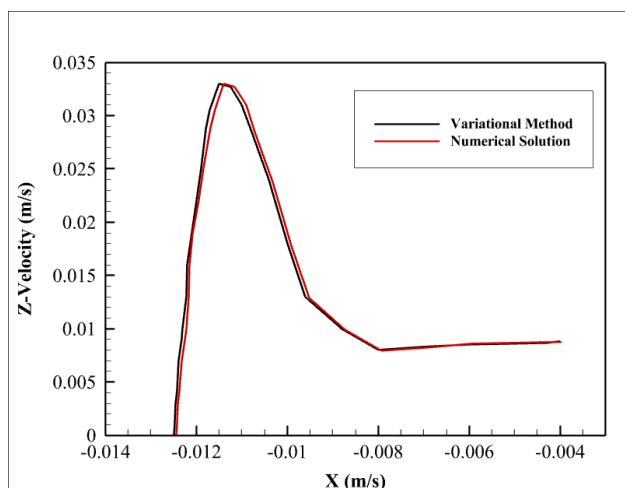
شکل ۶. اعتبارسنجی کانال با سطح مقطع مربع در میدان ۴ تسلا.

Figure 6. $\mathcal{E}T$ Validation in Square cross section at 4T



شکل ۷. اعتبارسنجی کانال با سطح مستطیل در میدان ۴ تسلا.

Figure 7. $\mathcal{E}T$ Validation in rectangular cross section at 4T

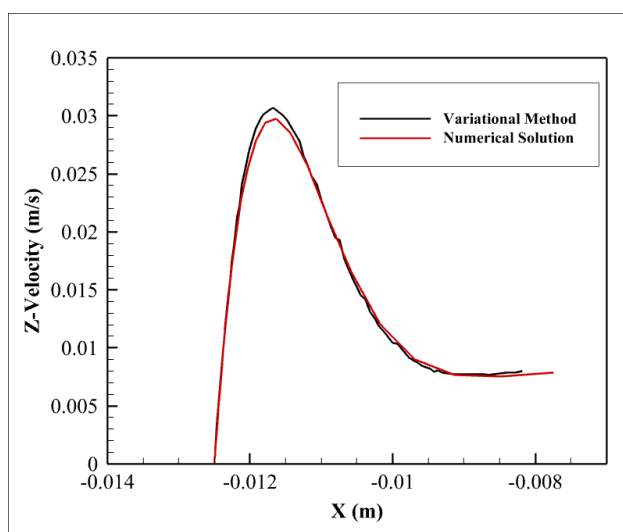


شکل ۸. اعتبارسنجی کانال با سطح مقطع مستطیل در میدان ۱ تسلا.

Figure 8. $\mathcal{A}T$ Validation in rectangular cross section at 1T

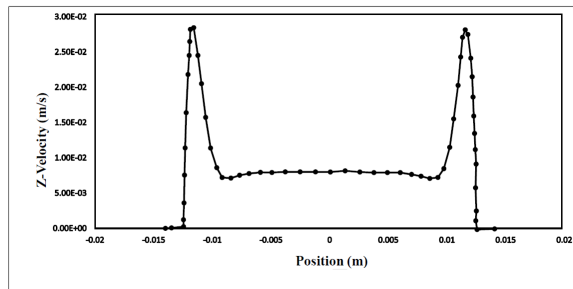
الف: تأثیر شدت میدان مغناطیسی بر پروفیل سرعت

در این قسمت از پژوهش، تأثیر شدت میدان مغناطیسی بر سرعت جریان عبوری از کانال بررسی شده است. در شکل‌های ۵ تا ۸، پروفیل سرعت تحت تأثیر میدان ۱ تسلا و ۴ تسلا در کانال با سطح مقطع مربع و مستطیل رسم شده است. در هسته‌ی مرکزی کانال، یک سرعت ثابت مشاهده می‌شود. اثر شدید نیروی لورنتس در قسمت مرکزی کانال باعث شده است تا هسته‌ی مرکزی یک سرعت ثابت داشته باشد. به دلیل برقراری شرط عدم لغزش در دیواره‌های داخلی کانال، سرعت در دیواره‌های کانال صفر می‌باشد. میدان مغناطیسی اعمال شده منجر به توزیع سهموی پتانسیل الکتریکی در طول دیواره‌های جانبی می‌شود. از آنجایی که چگالی جریان ورودی از دیواره‌های جانبی ثابت است، حداکثر پتانسیل در مرکز دیواره‌های جانبی منجر به میدان الکتریکی بالاتر در دیواره‌های جانبی می‌شود و طبق قانون اهم، سرعت در لایه‌ی جانبی افزایش می‌یابد. به همین دلیل بیشترین مقدار سرعت در نزدیکی دیواره‌های جانبی مشاهده می‌شود.



شکل ۵. اعتبارسنجی کانال با سطح مقطع مربع در میدان ۱ تسلا.

Figure 5. $\mathcal{A}T$ Validation in square cross section at 1T



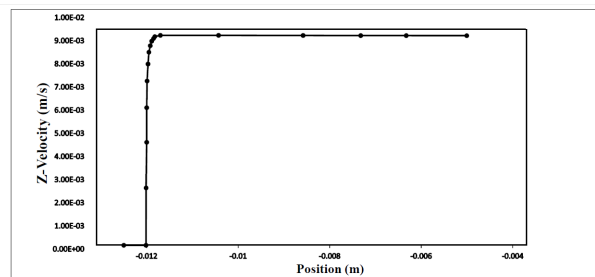
شکل ۱۰. پروفیل کامل سرعت در کانال با سطح مقطع مربع در میدان ۱ تسلا.

Figure 10. Full velocity profile in channel with square cross section at 1T.

ب: تأثیر شدت میدان مغناطیسی بر افت فشار

برای یافتن تأثیر میدان مغناطیسی اعمال شده بر افت فشار جریان در طول کانال، مقادیر افت فشار برای میدان‌های مغناطیسی مختلف و همچنین سطح مقطع‌های مربع و مستطیل محاسبه شده‌اند و نتایج در شکل زیر به نمایش درآمده‌اند. نتایج محاسبات نشان‌دهنده‌ی آن است که با افزایش شدت میدان مغناطیسی، مقدار افت فشار نیز افزایش می‌یابد. با افزایش شدت میدان مغناطیسی، مقدار نیروی لورنتز که برخلاف جریان در طول کانال عمل می‌کند نیز افزایش می‌یابد. با افزایش نیروی لورنتز، افت فشار جریان در طول کانال نیز افزایش می‌یابد. شکل ۱۱ نشان می‌دهد که با افزایش شدت میدان مغناطیسی از ۱ تسلا به ۴ تسلا، مقدار افت فشار در کانال با سطح مقطع مربع ۹ برابر و در کانال با سطح مقطع مستطیل ۱۲ برابر افزایش می‌یابد.

برای بررسی دقیق‌تر تأثیر شدت میدان مغناطیسی بر پروفیل سرعت، در شکل ۹، پروفیل سرعت در غیاب میدان در کانال با سطح مقطع مربع ارائه شده است. طبق نتایج به‌دست‌آمده، پروفیل سرعت کاملاً متفاوت از حالتی است که میدان اعمال می‌شود. سرعت در غیاب میدان، پس از رسیدن به مقدار ماکزیمم نه‌تنها کاهش نمی‌یابد، بلکه ثابت باقی‌مانده و عرض کانال را در یک مقدار ثابت طی می‌کند که دلیل این امر عدم حضور میدان مغناطیسی می‌باشد. در شکل ۱۰ نیز سرعت در حضور میدان مغناطیسی ۱ تسلا رسم شده تا بتوان آن را با نتایج شکل ۹ مقایسه کرد. همچنین برای اطمینان از تقارن پروفیل سرعت، در سطح مقطع با هندسه‌ی مربع و میدان مغناطیسی ۱ تسلا، یک بار پروفیل سرعت در عرض کانال به‌طور کامل رسم شده است. نمودار رسم‌شده در شکل ۱۰ نشان می‌دهد که پروفیل سرعت یک تقارن کامل دارد، سرعت در هر دو دیواره‌ی جانبی صفر بوده، در نزدیکی دیواره‌ها به مقدار ماکزیمم خود رسیده است و در مرکز کانال یک مقدار ثابت را تجربه می‌کند.



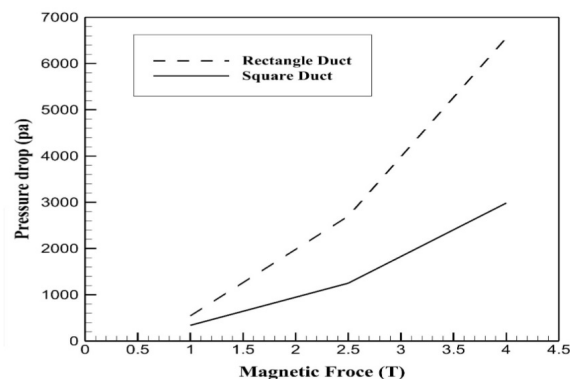
شکل ۹. پروفیل سرعت در کانال با سطح مقطع مربع بدون حضور میدان.

Figure 9. Velocity profile in channel with square cross section in the absence of the magnetic field.

مغناطیسی خارجی ایجاد می‌شود، باعث کاهش سرعت در مرکز کانال می‌شود. همچنین نیروی لورنتز باعث افزایش افت فشار در طول کانال می‌شود. با افزایش شدت میدان مغناطیسی از ۱ به ۴ تسلا، مقدار افت فشار در کانال با سطح مقطع مربع ۹ برابر و در کانال با سطح مقطع مستطیل ۱۲ برابر افزایش می‌یابد.

تغییر سطح مقطع ورودی کانال از مربع به مستطیل باعث افزایش به ترتیب ۱۱ و ۹ درصدی سرعت ماکزیمم روی دیواره‌های جانبی، در میدان ۱ تسلا و ۴ تسلا می‌شود. مقدار افزایش سرعت ماکزیمم روی دیواره‌های جانبی در مقایسه با میزان افزایش افت فشار بسیار ناچیز است. از آنجایی که افزایش شدت میدان مغناطیسی باعث افزایش ۱۱ برابری افت فشار در طول کانال با سطح مقطع مستطیل می‌شود، می‌توان نتیجه گرفت که تغییر ابعاد کانال و استفاده از سطح مقطع مستطیل اصلاً ایده‌آل نیست. درواقع معایب این سطح مقطع بسیار بیشتر از مزایای آن است. بهترین نتایج در حالتی به دست می‌آیند که نسبت ارتفاع به عرض کانال ۱ باشد.

با در نظر گرفتن سطح مقطع مربع به عنوان حالت ایده‌آل و بررسی تأثیر شدت میدان مغناطیسی بر سرعت ماکزیمم روی دیواره‌های جانبی، مشاهده می‌شود که با افزایش میدان مغناطیسی از ۱ به ۴ تسلا، سرعت ماکزیمم در کانال با سطح مقطع مربع، ۲ برابر افزایش می‌یابد. از طرفی دیگر، سرعت در مرکز کانال مقدار ثابتی معادل 0.1 m/s باقی می‌ماند و تغییرات آن قابل چشم‌پوشی است. با در نظر گرفتن میزان افزایش افت فشار ناشی از شدت میدان مغناطیسی، می‌توان نتیجه گرفت که افزایش شدت میدان مغناطیسی باعث افزایش شدید افت فشار می‌شود. به طور کلی می‌توان از شدت میدان مغناطیسی برای کنترل جریان و پایدار کردن رفتار



شکل ۱۱. نمودار افت فشار در میدان‌های مغناطیسی.

Figure 11. Diagram of pressure drop in magnetic fields.

ج: تأثیر تغییر ابعاد سطح مقطع کانال

نتایج موجود در جدول‌های ۱ تا ۴ (شبکه‌بندی با ۱۲۰۰۰۰۰) نشان می‌دهد که با تغییر ابعاد سطح مقطع کانال و تغییر نسبت ارتفاع به عرض کانال از ۱ و افزایش آن به ۲، سرعت ماکزیمم روی دیواره‌های جانبی، به ترتیب ۱۱ و ۹ درصد در میدان ۱ تسلا و ۴ تسلا افزایش می‌یابد. با افزایش ارتفاع کانال و به دلیل ثابت بودن طول کانال، سطح مقطع کانال مستطیل افزایش می‌یابد. با افزایش سطح مقطع کانال، مقدار نیروی لورنتز کاهش می‌یابد. در نتیجه سرعت در دیواره‌های کناری افزایش می‌یابد.

۶- نتیجه‌گیری

به کمک شبیه‌سازی فلز مایع خنک‌کننده‌ی سرب-لیتیم ۱۷ در یک بلنکت و بررسی رفتار مگنتوهیدرودینامیکی، نتایج زیر استخراج می‌شود:

طبق نتایج به دست آمده، پروفیل سرعت به صورت شکل ام است و گرادیان سرعت سیال در دیواره‌های کناری افزایش شدیدی داشته است. بر این اساس می‌توان نتیجه گرفت که نیروی لورنتزی که بر اثر اعمال میدان

$\mu (kg/s.m)$	لزجت دینامیکی سیال
$\mu_0 (H/m)$	تراوایی مغناطیسی
$\nu (m^2/s)$	لزجت سینماتیکی سیال
$\rho (kg/m)$	چگالی
$\sigma (s/m)$	هدایت الکتریکی سیال
φ	پتانسیل الکتریکی

۸-مراجع

- [1] S. Smolentsev, N. Morley, M. Abdou, R. Munipalli, R. Moreau, Current approaches to modeling MHD flows in the dual coolant lead lithium blanket, Magneto hydrodynamics, 42(2-3) (2006) 225-236.
- [2] C.N. Kim, A.H. Hadid, M.A. Abdou, Development of a computational method for the full solution of MHD flow in fusion blankets, Fusion Engineering and Design, 8 (1989) 265-270.
- [3] X. Wang, E. Mogahed, I. Sviatoslavsky, MHD, heat transfer and stress analysis for the ITER self-cooled blanket design, Fusion Engineering and Design, 24(4) (1994) 389-401.
- [4] K. Starke, L. Buhler, S. Horanyi, Experimental MHD-flow analyses in a mock-up of a test blanket module for ITER, Fusion Engineering and Design, 84(7-11) (2009) 1794-1798.
- [5] F.C. Li, D. Sutevski, S. Smolentsev, M. Abdou, Experimental and numerical studies of pressure drop in PbLi flows in a circular duct under non-uniform transverse magnetic field, Fusion Engineering and Design, 88(11) (2013) 3060-3071.

مگنتوهیدرودینامیک در فرآیند هم‌جوشی هسته‌ای استفاده کرد. به‌این ترتیب به سادگی می‌توان با افزایش شدت میدان مغناطیسی خارجی، افت فشار را افزایش داد و فرآیند گداخت را پایدار کرد.

اگرچه افت فشار سیال هیدرودینامیک مغناطیسی به‌عنوان یک عامل نامطلوب در فرآیند هم‌جوشی هسته‌ای در نظر گرفته می‌شود، اما می‌توان در رآکتور هم‌جوشی هسته‌ای از افت فشار به‌عنوان عامل کنترلی استفاده کرد؛ به این ترتیب که در صورت وقوع شرایط بحرانی، می‌توان با افزایش شدت میدان مغناطیسی از ۱ تسلا به ۴ تسلا، افت فشار را طبق نتایج فوراً کاهش داد و رآکتور را به حالت پایداری رساند.

۷-فهرست علائم

علامت (لاتین)	نشانه
چگالی شار مغناطیسی	$\bar{B} (kg/s^2.A)$
چگالی جریان الکتریکی	$\bar{J} (C/s)$
عدد هارتمن	Ha
رینولدز مغناطیسی	Re_m
نسبت افت فشار	R
فشار سیال	$P (pa)$
طول	L
سرعت سیال	$V (m/s)$
نسبت بین هدایت الکتریکی دیواره‌ها و هدایت الکتریکی سیال	C_w
جهت‌های مختصات	x,y,z
علامت (یونانی)	نشانه

- [12] Smolentsev, S., et al., MHD and heat transfer considerations for the US DCLL blanket for DEMO and ITER TBM. *Fusion Engineering and Design*, (2021) .83(10): p. 1788-1791.
- [13] Z.H. Liu, L. Chen, M.J. Ni, N.M. Zhang, Effects of magnetohydrodynamic mixed convection on fluid flow and structural stresses in the DCLL blanket, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 135 (2019) 847-859.
- [14] S.I. Sidorenko, A.Y. Shishko, Variational method of calculation of MHD flows in channels with large aspect ratios and conducting walls, *Magneto Hydrodynamics*, 27(4) (1991) 437-445.
- [15] E.M. De Les Valls, L. Sedano, L. Batet, I. Rikapito, A. Aiello, O. Gastaldi, F. Gabriel, Lead–lithium eutectic material database for nuclear fusion technology, *Journal of Nuclear Materials* 376(3) (2008) 353-357.
- [16] L. Buhler, S. Horanyi, and E. Arbogast, Experimental investigation of liquid-metal flows through a sudden expansion at fusion-relevant Hartmann numbers *Fusion Engineering and Design* (2007) 82 2239–2245.
- [6] I. Fernández-Berqueruelo, D. Rapisarda, I. Palermo, L. Maqueda, D. Alonso, T. Melichar, O. Frýbort, L. Vála, Á. Ibarra, Thermal-hydraulic design of a DCLL breeding blanket for the EU DEMO, *Fusion Engineering and Design*, 124 (2017) 822-826.
- [7] YuanMa, RasulMohebbi, M.M.Rashidi, ZhigangYang, Mikhail A.Sheremet, Numerical study of MHD nanofluid natural convection in a baffled U-shaped enclosure, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 130 (2019) 123134-.
- [8] H. Hulin, Y. Shimou, A. Fawad, Effect of nano-coating on corrosion behaviors of DCLL blanket channel, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 141 (2019) 444-456.
- [9] C. Soto, S. Smolentsev, C. García-Rosales, Mitigation of MHD phenomena in DCLL blankets by Flow Channel Inserts based on a SiC-sandwich material concept, *Fusion Engineering and Design*, 151 (2020) 111381.
- [10] J. Slabber, PBMR Safety analyses and tests in South Africa Presentation at the IAEA Workshop on Safety demonstration and market potential for high temperature gas cooled reactors, 273 (2020).
- [11] J. Jonas and I. Fernandez, components internal and external del Programa Consolider TECNO FUS Technical report, EURATOM-CIEMAT Association, CSD 079 (2021).

بررسی عددی و آزمایشگاهی سیستم نوین سرمایش ساختمان مبتنی بر سیکل تبرید تراکمی

سعید وحیدی^۱، سید حسن نبوی^۲، مهدی ذاکری^۳، محمدمهدی ناصریان^{۴*}، امین حیدریان^۵

۱- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تهران، ایران.

۲- استادیار، گروه مهندسی برق، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تهران، ایران.

۳- کارشناسی، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تهران، ایران.

۴- دکتری، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تهران، ایران.

چکیده

امروزه از سیستم‌های سرمایش مختلفی، از جمله کولر آبی، اسپلیت، هواساز و غیره جهت سرمایش ساختمان استفاده می‌شود که هرکدام از آن‌ها دارای چندین مزیت و عیب می‌باشد. یکی از مهم‌ترین ایراداتی که می‌توان برای بسیاری از سیستم‌های سرمایشی نام برد، یکنواخت نبودن دما در فضاهای ساختمان می‌باشد. مهم‌ترین بخش اتلاف حرارت ساختمان با محیط اطراف، از طریق پنجره‌ها می‌باشد. بر این اساس، در این پژوهش، یک سیستم سرمایش جدید مبتنی بر سیکل تبرید تراکمی پیشنهاد شده و به صورت عددی و آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفته است. ارزیابی آزمایشگاهی این سیستم در محیط کارگاه تهویه مطبوع و ارزیابی عددی آن در نرم‌افزار دیزاین بیلدر انجام گرفته است. به علاوه، این سیستم با سیستم سرمایش اسپلیت مقایسه گردیده است. از مهم‌ترین نتایج به دست آمده از این پژوهش، می‌توان به توزیع یکنواخت دمای محیط و کاهش مصرف انرژی مقایسه با سیستم‌های معمول سرمایش اشاره نمود. در هنگام استفاده از سیستم کویل پنجره‌ای، تفاوت بیشینه و کمینه دما در بخش وسیعی از اتاق کمتر از ۱ درجه سلسیوس اندازه‌گیری شده است. حال آنکه در سیستم اسپلیت، با حرکت از سمت سقف اتاق به سمت کف، دما حدود ۲ درجه سلسیوس تغییر می‌کرد. همچنین این سیستم در مقایسه با سیستم سرمایش اسپلیت حدود ۶/۷٪ انرژی کمتری مصرف نمود.

کلمات کلیدی

سیستم سرمایش ساختمان، سیستم کویل پنجره‌ای، سیستم اسپلیت، بررسی آزمایشگاهی، بررسی عددی، توزیع یکنواخت دما.

Numerical and Experimental study of a new building cooling system based on compression refrigeration cycle

Saeed Vahidifar¹, Seyed Hasan Nabavi², Mahdi Zakeri³, Mohammad Mahdi Naserian^{4*}, Amin Heydarian⁵

1-Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran.

2- Assistant Professor, Department of Electrical Engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran.

3,5- B.Sc, Department of Mechanical Engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran.

4- PhD, Department of Mechanical Engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran.

Abstract

Today, various cooling systems such as evaporative cooler, split, air conditioner etc., are used to cool the building, which have a number of advantages and disadvantages. One of the most important disadvantages that can be mentioned for many cooling systems is the non-uniform temperature distribution in the building zones. The most important part of the building's heat loss is through the windows. Accordingly, in this research, a new cooling system based on compression refrigeration cycle is proposed and examined numerically and experimentally. Experimental evaluation of this system was performed in the air conditioning workshop and its numerical evaluation was performed in Design Builder software. In addition this system was compared with split cooling system. Among the most important results obtained from this research, we can point out the uniform distribution of the indoor air temperature and the reduction of energy consumption compared to the convective cooling systems. When using a window coil system, the difference between the maximum and minimum temperature in a large part of the room was less than 1 degree Celsius. In the split system, however, the temperature has changed by about 2 degrees Celsius by moving from the ceiling of the room to the floor. Moreover, energy consumption of the system was 6.7% lower than that of split cooling system.

Keywords

Building cooling system, Window coil system, Split system, Experimental evaluation, Numerical evaluation, Uniform temperature distribution.

۱- مقدمه

از ۳۳,۳۳٪ از مصرف نهایی انرژی را به صورت جهانی تشکیل می‌دهد و به عنوان منبع مهم انتشار CO₂ در نظر گرفته می‌شود [۲]. علاوه بر این، مشخص شد که نیمی از انرژی مصرفی در ساختمان توسط سیستم‌های تهویه مطبوع^۱ مصرف می‌شود [۳]. آکیر و همکاران [۴] مقدار آن را ۶۰٪ گزارش کرده‌اند. در آسیا، آمریکای لاتین، هند و چین انتظار می‌رود روند تقاضای سرمایه‌گذاری با افزایش چشمگیری از ۰/۸ اگزاژول در سال ۲۰۱۰ به ۵/۸ اگزاژول در سال ۲۰۵۰ برسد. این در حالی است که برای چین انتظار می‌رود افزایش تقاضای سرمایه‌گذاری این کشور به مقداری برابر با آمریکای لاتین و آسیا تا سال ۲۰۴۰ برسد [۵].

توسعه‌ی یک فناوری جدید برای ارتقای بهره‌وری و صرفه‌جویی در مصرف انرژی در ساختمان‌ها یک مسئله‌ی مهم در میان دولت‌ها و جوامعی بوده است که هدف آن‌ها کاهش مصرف انرژی بدون تأثیر بر آسایش حرارتی در شرایط مختلف آب و هوایی است [۶]. تلفیق فناوری‌های ذخیره‌ی انرژی گرمایی^۲ در ساختمان‌ها کمک به کاهش بارهای اوج، امکان ادغام منابع انرژی تجدیدپذیر و مدیریت کارآمد انرژی گرمایی را فراهم نموده و بنابراین منجر به بهبود بهره‌وری انرژی در ساختمان‌ها می‌شود [۷-۹]. حرارت نهفته با استفاده از مواد تغییر فاز دهنده^۳، به دلیل توانایی بالای ذخیره‌ی انرژی و توانایی ذخیره‌ی انرژی گرمایی، مورد توجه گسترده‌ای در برنامه‌های ساختمانی قرار گرفته است [۱۰-۱۲]. یک تکنیک توسعه‌دهنده‌ی ذخیره‌ی انرژی گرمایی مربوط به بهبود سرمایه‌گذاری با کاهش تقاضای انرژی در بخش‌های ساختمان با استفاده از مواد تغییر فاز دهنده می‌باشد که طی چهار دهه‌ی

جمعیت و اقتصاد جهان به سرعت در حال رشد است که این امر منجر به افزایش گسترده‌ی تقاضا و مصرف انرژی در جهان شده است. امروزه شرط لازم برای حضور قدرتمند در عرصه‌های جهانی، ضرورت وجود یک طرح بهینه‌سازی در مصرف منابع مختلف انرژی در کشور است و می‌تواند تحول اقتصادی عظیمی به دنبال داشته باشد. در این میان، صنعت ساختمان یکی از صنایع بزرگ و تأثیرگذار بر مصرف انرژی در کشور محسوب می‌شود و از طرفی این صنعت به عنوان یکی از اصلی‌ترین معیارهای صنعتی شدن هر کشور و نماد رشد و توسعه‌ی مطرح است و توجه خاص به این صنعت باعث بهبود و توسعه‌ی آن خواهد شد. با توجه به اینکه در کشور ما ۹۸/۶ درصد از انرژی اولیه مربوط به عرضه‌ی نفت خام، فرآورده‌های نفتی و گاز طبیعی می‌باشد، هرگونه استفاده‌ی غیرکارا از حامل‌های انرژی، علاوه بر آنکه می‌تواند عمر ذخایر پایان پذیر نفت و گاز را کاهش داده، محیط زیست را با خسارت‌های جدی مواجه نموده و صدمات جبران‌ناپذیری را به فرآیند توسعه‌ی پایدار، افزایش درآمدهای ارزی و گسترش زیرساخت‌های اقتصادی کشور وارد کند.

بر اساس داده‌های منتشرشده توسط یورواستات، کشورهای عضو اتحادیه‌ی اروپا افزایش قابل توجهی در تقاضای انرژی نهایی خود داشته‌اند که تقریباً به معادل ۱۰۸۴ میلیون تن نفت در سال ۲۰۱۵ رسیده است که ۴۲۲ میلیون تن مربوط به بخش‌های مربوط به ساختمان است که ۳۹٪ کل تقاضا می‌باشد [۱]. بخش ساختمان به عنوان بزرگ‌ترین بخش مصرف‌کننده‌ی انرژی، بیش

۱- Heating, ventilation, and cooling (HVAC)

۲- Thermal Energy Storage

۳- Phase Changing Material

غیریک‌نواخت‌شدن توزیع دمای ساختمان می‌شود؛ بنابراین در صورت کنترل و بهینه‌سازی تبادل حرارت از پنجره‌ها، کاستی‌های سیستم‌های معمول تهویه مطبوع برطرف خواهد شد. پژوهشگران با توسعه فناوری تولید شیشه و پنجره‌های هوشمند، تأثیرات شگرفی بر کیفیت فضای داخلی ساختمان‌ها داشته است. فناوری پنجره‌های هوشمند می‌تواند در روزهای گرم تابستان که نور آفتاب به داخل ساختمان‌ها وارد می‌شود و نیاز به استفاده از دستگاه‌های خنک‌کننده‌ی هوا را افزایش می‌دهد، به صورت هوشمند تاریک شود و از انعکاس نور جلوگیری کند و در عوض در فصول سرد سال، دوباره به حالت اول باز گردد و شفاف شود. این فناوری تأثیر خیره‌کننده‌ای بر مدیریت مصرف انرژی در جهت کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی در ساختمان دارد [۲۱-۲۷].

در پژوهش‌های مختلف، به بررسی اثر توزیع یک‌نواخت دما بر روی شرایط آسایش پرداخته شده است [۲۷۸-۲۹]. نینگ و همکاران [۲۹] سیستم سرمایش سقفی تشعشعی نوینی را به منظور یک‌نواخت‌نمودن دمای اتاق در مناطق گرم و شرجی چین، معرفی نمودند. جزی‌زاده و همکاران [۳۰] اثر به‌کارگیری سیستم کنترلی را که بر روی سیستم تهویه مطبوع نصب شده و مطابق با الگوی آسایش ساکنین ساختمان به کنترل شرایط آسایش می‌پردازد، مورد بررسی قرار دادند. ارزیابی آن‌ها نشان داد این سیستم با یک‌نواخت‌نمودن توزیع دما، موجب افزایش آسایش ساکنین ساختمان می‌گردد. زانگ و همکاران [۳۱] در پژوهش خود روش بهینه‌سازی جدیدی را به منظور یک‌نواخت‌نمودن توزیع دما همراه با کاهش مصرف انرژی پیشنهاد نمودند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد که این روش موجب کاهش مصرف انرژی و همزمان افزایش آسایش حرارتی ساکنین می‌گردد.

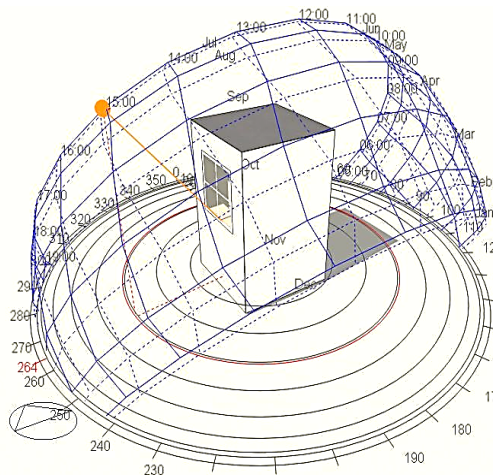
گذشته بسیار مورد توجه بسیاری از معماران و مهندسان قرار گرفته است [۱۳-۱۶]. در کشور ما هم در صورتی که روند مصرف کنونی انرژی ادامه یابد، ایران به‌زودی از گروه کشورهای صادرکننده انرژی خارج شده و مصرف داخلی انرژی از میزان تولید آن بالاتر می‌رود. کارشناسان سازمان بهینه‌سازی مصرف انرژی پیش‌بینی کرده‌اند که این امر در سال ۱۴۰۴ خورشیدی به وقوع بپیوندد [۱۷].

اشرف‌زاده و نیک‌پور [۱۸] در پژوهش خود به بررسی تأثیر سایبان در میزان بار سرمایشی و گرمایشی در جبهه‌های مختلف ساختمان جهت کاهش مصرف انرژی در شهر کرمان پرداختند. آن‌ها با استفاده از داده‌های اقلیمی شهر کرمان به کمک نرم‌افزار شبیه‌سازی، چند نوع سایبان را مورد بررسی قرار دادند و مناسب‌ترین نوع سایبان را با در نظر گرفتن ملاحظات مربوط به انرژی مصرفی ساختمان ارائه نمودند.

یزدانی و همکاران [۱۹]، انرژی بار سرمایشی ساختمان را با استفاده از سایبان و عایق حرارتی در سه اقلیم گرم، معتدل و سرد ایران تحلیل نمودند. آن‌ها یک مدل واقعی انتخاب و با استفاده از نرم‌افزار دیزاین بیلدر، میزان انرژی مصرفی جهت سرمایش را در سه شهر اهواز، تهران و تبریز بر اساس دو راهبرد مختلف شبیه‌سازی نمودند و میزان تأثیرات آن‌ها بر مصرف انرژی الکتریکی در روز دهم تیرماه را مورد بررسی و مقایسه قرار دادند.

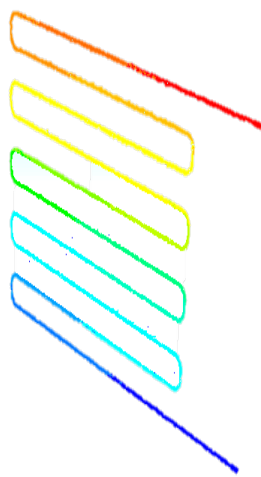
در صورت به‌کارگیری مبحث ۱۹ مقررات ملی ساختمان [۲۰] و عایق‌کاری ساختمان، سهم زیادی از تبادل حرارت بین محیط ساختمان و فضای بیرون از طریق پنجره‌ها خواهد بود. به علاوه، فضاهای نزدیک به پنجره‌ها اختلاف دمای کمتری نسبت به فضاهای دیگر ساختمان نسبت به فضای بیرون داشته باشد که این امر موجب

از خارج به داخل ساخته شده است که تمامی اندازه‌ها و مشخصاتی، چون ضرایب هدایت حرارتی همگی بر اساس استانداردهای موجود می‌باشد. شماتیک اتاق در شکل (۱) به نمایش درآمده است.



شکل ۱: شماتیک اتاق در فصل تابستان

همان‌طور که در قسمت مقدمه بیان شد، سیستم سرمایشی جدید مبتنی بر کویل سرمایشی بوده و بر روی پنجره تعبیه گردیده است. در این کویل شیشه‌ای شفاف، آب با دمای کمتر از قسمت پایین وارد کویل شده و پس از تبادل حرارت با دمای بیشتر از قسمت بالای کویل خارج می‌گردد. شماتیک کویل در شکل زیر به نمایش درآمده است.



شکل ۲: شماتیک کویل شیشه‌ای به کار گرفته شده در این پژوهش

در این مقاله، تأثیر به کارگیری کویل سرمایشی شفاف با سیال عامل آب، درون پنجره‌ها، بر روی سرمایش ساختمان به صورت عددی و آزمایشگاهی مورد ارزیابی قرار خواهد گرفت. علت استفاده از کویل در پنجره در ابتدا به منظور یک نواخت نمودن توزیع دما و در نتیجه شرایط آسایش می‌باشد. به علاوه، آب موجود در کویل از طریق انعکاس و جذب قسمتی از طیف مادون سرخ نور خورشید (که با ورود به فضای اتاق موجب گرمایش آن می‌شود)، موجب کاهش مصرف انرژی مورد نیاز برای سرمایش می‌گردد. بدین منظور، ابتدا به طراحی و سپس به بررسی و آنالیز انتقال حرارت دو اتاقک با شرایط مرزی و ابعادی یکسان با سیستم‌های سرمایش متفاوت که در یکی از سیستم کنونی و در دیگری از سیستم اسپلیت استفاده شده است، می‌پردازیم.

این دو سیستم به طور مجزا به صورت زیر مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است:

۱- انجام آزمایش و مقایسه به صورت عملی و در محیط کارگاه با شرایط مرزی و ابعادی واقعی بر اساس استانداردهای موجود.

۲- شبیه سازی و مقایسه با استفاده از محیط نرم افزار دیزاین بیلدر با مشخصات و داده‌های آزمایش عملی و با کمک از روش حل و تحلیل دینامیک سیالات محاسباتی. که در این مقاله به شرح هریک از روش‌ها و مقایسه‌ی نتایج با یکدیگر خواهیم پرداخت.

۲- مدل سازی عددی

اتاق مورد بررسی در این مقاله اتاقی به ابعاد $2/15 \times 1/4 \times 1/4$ متر می‌باشد. دیوارهای اتاق از لایه‌های سیمان، آجر ۲ سانتی متری، پشم شیشه و گچ به ترتیب

جدول ۲: تنظیمات انجام شده در نرم افزار دیزاین بیلدر

پارامتر	مقدار
طول جغرافیایی	$36/31^{\circ}$
عرض جغرافیایی	$59/53^{\circ}$
ارتفاع	۱۰۳۷ متر
کاربری ساختمان	مسکونی
دمای تنظیمی (دمای آسایش)	$21^{\circ}C$
تعویض هوای طبیعی	۰
ضریب عملکرد	۳
پنجره	دو جداره‌ی شفاف (ضخامت هر لایه ۳ میلی‌متر، با فاصله‌ی هوایی ۶ میلی‌متر)

۳- بررسی آزمایشگاهی

به منظور مطالعه‌ی آزمایشگاهی سیستم طراحی شده، نمونه‌ی اولیه‌ی این سیستم در کارگاه تهویه‌ی مطبوع دانشکده‌ی فنی منتظری مشهد ساخته و نصب گردید. این سیستم از یک کویل شیشه‌ای که بر داخل پنجره‌ی اتاق جایگذاری شده (شکل (۳)) و همچنین سیکل تبرید تراکمی که در خارج از اتاق تعبیه شده، تشکیل شده است. سیال عامل سیکل تبرید تراکمی $R314$ و سیال آب کویل پنجره‌ای آب می‌باشد. استفاده از آب به علت شفاف بودن (عبور نور خورشید بدون مزاحمت از پنجره، ظرفیت گرمایی ویژه‌ی بالا و غیرسمی بودن (در صورت نشت) می‌باشد.

برای تحلیل عددی مسأله‌ی یادشده، نخست باید معادله‌ی دیفرانسیلی حرکت هوا بر روی پنجره را مورد بررسی قرار داد. بدین منظور محورهای Z و Y را در راستای صفحه‌ی پنجره و محور X را در راستای عمود بر صفحه در نظر گرفته می‌شود. جریان سه‌بعدی با خواص فیزیکی دمای دیواره‌ی ثابت و بیشتر از دمای جریان آزاد ورودی در نظر گرفته شده است. تغییر چگالی در اثر تغییرات دما در نیروی شناوری به وسیله‌ی تقریب بوزینسک اعمال می‌گردد. جریان سیال در برخورد با هندسه به صورت سه‌بعدی، تراکم‌ناپذیر و پایدار در نظر گرفته شده است. جهت جلوگیری از افت فشار آب داخل کویل و همچنین در نظر گرفتن کار پمپ برای به گردش درآوردن سیال مورد نظر، در ورودی سیال، فشاری معادل ۵۰ پاسکال در نظر گرفته شده است. شرایط مرزی کامل پژوهش در جدول (۱) آورده شده است.

جدول ۱: شرایط مرزی

شرط مرزی	مقدار
دمای ورودی آب به کویل	$16^{\circ}C$
دمای خروجی آب از کویل	$17^{\circ}C$
دمای هوای طرح خارج	$45^{\circ}C$
ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی خارجی	10 W/m^2

مدل توربولانسی استفاده شده در تحلیل دینامیک سیالات محاسباتی، $k - \varepsilon$ و طرح مجزاسازی^۱ معادلات، بالادست^۲ انتخاب شده است. تنظیمات انجام شده جهت مدل سازی عددی در نرم افزار دیزاین بیلدر در جدول ۲ مشخص شده است.

۱- Discretization

۲- upwind

ملی ساختمان، مهم‌ترین محل اتلاف حرارت ساختمان می‌باشند؛ بنابراین کنترل تبادل حرارت از پنجره‌ها منجر به یک‌نواخت‌شدن دما و آسایش حرارتی در نواحی مختلف اتاق می‌گردد؛ بنابراین یکی از مهم‌ترین مزیت‌های این سیستم کمینه‌نمودن تغییرات دما در اتاق می‌باشد. به‌منظور بررسی یک‌نواختی دمایی، تعداد ۸ سنسور دما در اتاق تعبیه شده است. ۵ عدد از این سنسورها به فاصله‌ی ۳۰ سانتی‌متری از همدیگر بر روی دیوار نصب شد و ۳ سنسور دیگر هم هرکدام به فاصله‌ی ۵۰ سانتی‌متری از یکدیگر بر روی سقف به همین ترتیب نصب گردیدند.

تبادل حرارت بین سیکل آب و سیکل تبرید از طریق یک مبدل حرارتی کوپلی با کوپل مسی انجام می‌پذیرد. اجزای مختلف دستگاه در شکل‌های (۳ الی ۶) نشان داده شده‌اند. این سیکل برای تأمین بار سرمایی مورد نیاز در فصل تابستان طراحی و ساخته شده است. به‌منظور شبیه‌سازی فضای گرم در اطراف اتاق آزمایش، پیرامون اتاق پوشانده شد (شکل (۵) و برای گرمایش از ۴ المنت الکتریکی با توان ۱۰۰۰ وات مطابق با شکل (۶) استفاده شده است. به‌منظور بررسی عملکرد این سیستم در حالت حدی، دمای محیط اطراف برابر با ۴۵ درجه‌ی سلسیوس، تنظیم شده است. پنجره‌ها در صورت رعایت اصول عایق‌بندی دیوارها مطابق با مبحث ۱۹ مقررات

جدول ۳: مشخصات بستر آزمون

نوع تجهیز	نام محصول	سازنده	مدل
پمپ خطی	Tobler	سوئیس	w ۷۸-j۸۰/۳۵-IS۲۵
کمپرسور نیمه‌بسته	Panasonic	ژاپن	hp/۱-QB-C۱۶GPX۵
کندانسور	Subcool	ایران	KW ۲-SUBCOOL
شیر انبساط	Alco	ایتالیا-آمریکا	۱۰۰HW-TCLE

هندسه‌ی کوپل و پنجره‌ی بررسی‌شده در این پژوهش در جدول (۴) آورده شده است.

جدول ۴: هندسه‌ی کوپل و پنجره

تجهیز	ابعاد (مقدار)
پنجره	۰/۸۳*۰/۸۸
طول کوپل	۷/۵ متر
قطر کوپل	۰/۰۱ متر
تعداد ردیف کوپل	۹



شکل ۵: پوشش فضای اطراف اتاق به منظور تثبیت دمای هوای محیط بیرون



شکل ۳: پنجره با کویل شیشه‌ای استفاده‌شده در این پژوهش

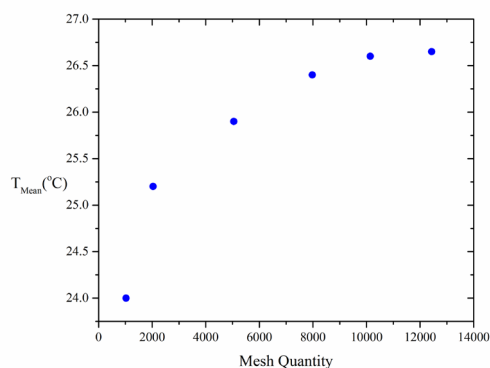


شکل ۶: استفاده از المنت‌های الکتریکی به منظور شبیه‌سازی شرایط بیرون در تابستان

هدف اصلی اندازه‌گیری دمای اتاق با هشت سنسور این بود که توزیع دمای نقاط مختلف اتاق بررسی شود. به‌منظور مطالعه‌ی دقیق توزیع دما، سنسور $ds18b20$ انتخاب گردید. دقت نمایش دما یک‌صدم درجه‌ی سلسیوس می‌باشد. نمایشگر و آردوینو سیستم اندازه‌گیری دما بر روی یک قاب دیواری نصب شده و از بیرون بر روی دیوار اتاق نصب گردید.

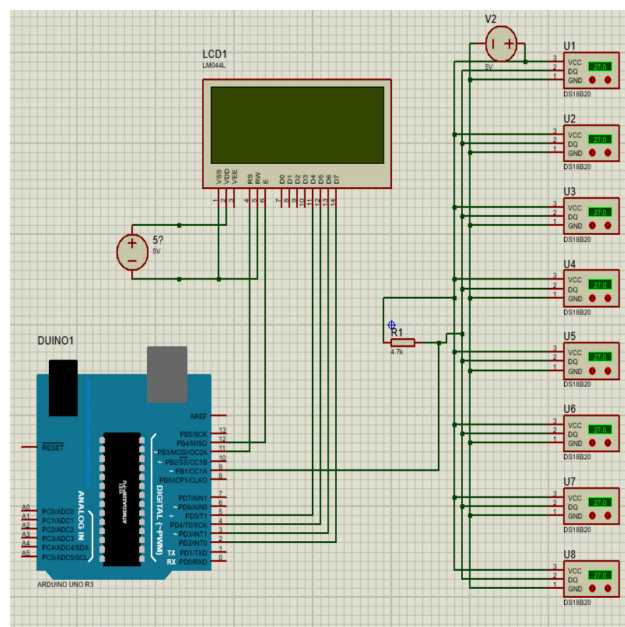


شکل ۴: نمایشی از اتاق و سیستم سرمایش استفاده‌شده



شکل ۸: بررسی استقلال از شبکه

همان‌طور که در شکل‌های (۹) و (۱۰) ملاحظه می‌شود، استفاده از این سیستم، در مقایسه با اسپلیت موجب یک‌نواختی بیشتر دما در اتاق شده است، به‌طوری‌که تفاوت بیشینه و کمینه در بخش وسیعی از اتاق، کمتر از ۱ درجه‌ی سلسیوس می‌باشد. حال آنکه در سیستم اسپلیت، با حرکت از سمت سقف اتاق به سمت کف آن حدود ۲ درجه‌ی سلسیوس دما تغییر می‌کند. عدم توزیع یک‌نواخت دمای اتاق در حالت استفاده از اسپلیت، ناشی از ورود گرما از پنجره به‌علت اختلاف زیاد دمای هوای داخل و خارج (تقریباً ۲۰ درجه‌ی سلسیوس) می‌باشد. به‌علاوه، هوا در اطراف تبخیرگر^۱ اسپلیت، با مبرد با دمای ۵ درجه‌ی سلسیوس تبادل حرارت دارد، حال آنکه در سیستم پنجره‌ای، آب با دمای ۱۶ درجه‌ی سلسیوس وارد کویل می‌شود؛ بنابراین اختلاف دمای ۲۰ درجه‌ای مبرد در اواپراتور با دمای تنظیمی اتاق (۲۵ درجه‌ی سلسیوس)، در مقایسه با اختلاف دمای ۹ درجه‌ای آب ورودی به کویل و دمای تنظیمی اتاق، منجر به ایجاد هسته‌ی خنک‌تر در اطراف اسپلیت شده که خود این امر منجر به غیریک‌نواختی دمای اتاق می‌گردد.



شکل ۷: شماتیک مدار طراحی‌شده اندازه‌گیری دما با استفاده از نرم‌افزار پروتئوس

۴- بررسی نتایج:

پس از انجام شبیه‌سازی برای شهر مشهد، نتایج ذیل به‌دست می‌آیند:

۴-۱ نتایج عددی:

۴-۱-۱ بررسی استقلال از شبکه:

به‌منظور بررسی استقلال از شبکه‌ی نتایج حل عددی، میانگین دمای اتاق در تعداد مختلف شبکه مورد ارزیابی قرار گرفت و با توجه به شکل، مستقل‌بودن نتایج از شبکه در تعداد ۱۰۱۲۵ شبکه محرز گردید، بدین ترتیب تعداد شبکه‌ی ۱۰۱۲۵ انتخاب گردید.

به منظور بررسی دو سیستم از لحاظ مصرف انرژی، میزان مصرف سیستم‌های مذکور در نرم‌افزار دیزاین بیلدر مورد بررسی قرار گرفت. نتایج شبیه‌سازی انرژی این دو سیستم در نرم‌افزار دیزاین بیلدر نشان می‌دهد مصرف انرژی سیستم اسپلیت ۲۰۹ کیلووات ساعت و مصرف انرژی سیستم کویل پنجره‌ای در بازه‌ی زمانی یکسان ۱۹۵ کیلووات ساعت می‌باشد. با توجه به نتایج، مصرف انرژی سیستم پنجره‌ای حدود ۶/۷٪ کمتر از سیستم اسپلیت می‌باشد.

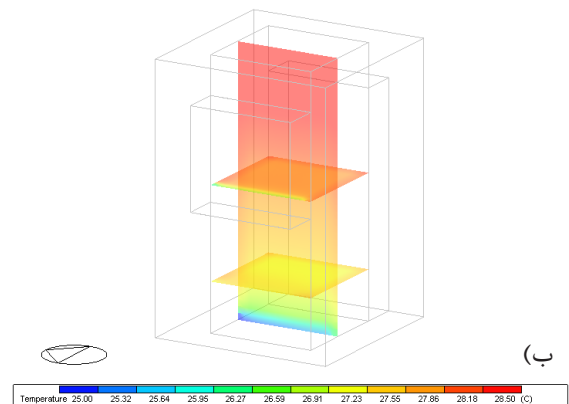
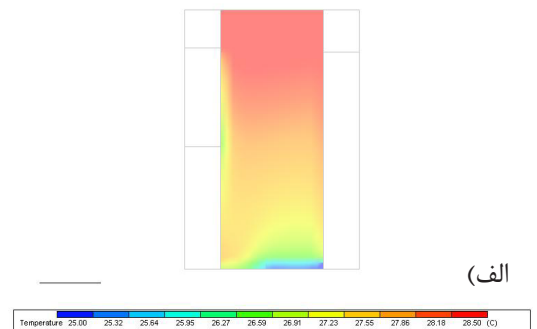
۲-۴ نتایج آزمایشگاهی و اعتبارسنجی حل عددی:

پس از پایدارشدن انتقال حرارت و ثابت شدن دماها، نسبت به ثبت داده‌ها اقدام گردید و دماها همان‌طور که در جدول (۵) ملاحظه می‌گردد، به دست آمدند. با توجه به این جدول، درحالی‌که دمای هوای بیرون ۴۵ درجه‌ی سلسیوس می‌باشد، ۸ سنسور حداکثر نوسان دمایی حدود ۱ درجه‌ی سلسیوس را نشان می‌دهد که کاملاً با مدل‌سازی عددی هم‌خوانی دارد.

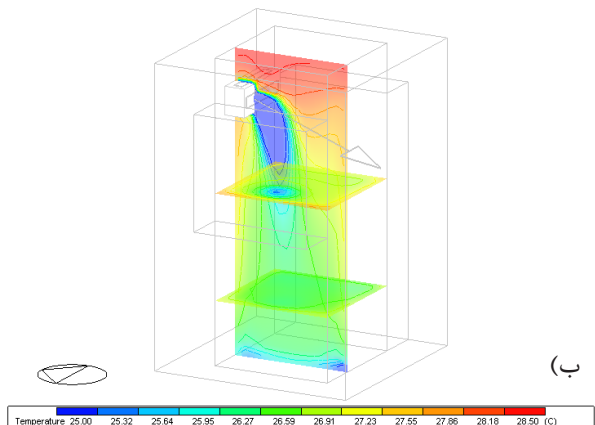
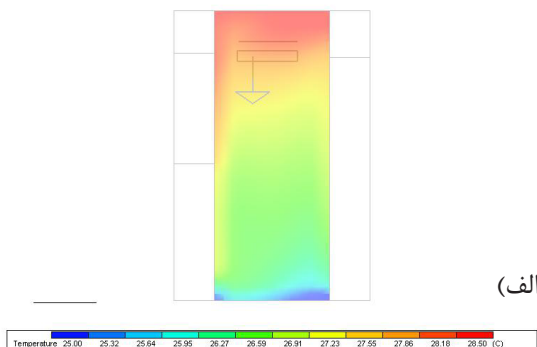
جدول ۵: خروجی دمای سنسورهای مطالعه‌ی آزمایشگاهی (بر حسب

درجه‌ی سلسیوس)

شماره‌ی سنسور	مقدار دما (درجه‌ی سلسیوس)
۱	۲۷/۱۹
۲	۲۷/۰۶
۳	۲۶/۸۷
۴	۲۶/۵۶
۵	۲۶/۴۲
۶	۲۶/۳۸
۷	۲۶/۲۳
۸	۲۶/۱۲



شکل ۹: کانتور دمای محیط اتاق در سرمایش با کویل پنجره‌ای در نرم‌افزار دیزاین بیلدر: (الف) نمای جانبی، (ب) نمای ایزومتریک.



شکل ۱۰: کانتور دمای محیط اتاق در سرمایش با اسپلیت در نرم‌افزار دیزاین بیلدر: (الف) نمای جانبی، (ب) نمای ایزومتریک.

۵- نتیجه گیری:

در این پژوهش، یک سیستم سرمایش جدید مبتنی بر سیکل تبرید تراکمی پیشنهاد گردید و به صورت عددی و آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفت. ارزیابی آزمایشگاهی این سیستم در محیط کارگاه تهویه مطبوع دانشگاه فنیو حرفه‌ای خراسان رضوی و ارزیابی عددی آن در نرم‌افزار دیزاین بیلدر انجام گرفت. در این سیستم، سرمایش از طریق کویل‌های پنجره‌ای با سیال عامل آب اتفاق می‌افتد. از آنجایی که در ساختمان‌ها در صورت رعایت مبحث نوزدهم مقررات ملی ساختمان، مهم‌ترین بخش تبادل حرارت با محیط ساختمان پنجره‌ها می‌باشد، استفاده از سیستم پنجره‌ای، ضمن کاهش انتقال حرارت به بیرون، منجر به یک‌نواختی دمایی در ساختمان و در نتیجه آسایش حرارت یک‌نواخت در کل نواحی ساختمان خواهد شد. عملکرد سیستم مذکور با سیستم سرمایش اسپلیت مقایسه شد. از مهم‌ترین نتایج به دست آمده از این پژوهش، می‌توان به توزیع دمای یک‌نواخت (اختلاف دمای حدود ۱ درجه‌ی سلسیوس در اتاق) و کاهش مصرف انرژی حدود ۶/۷٪ ناشی از عملکرد این سیستم در مقایسه با سیستم سرمایش اسپلیت اشاره نمود.

تأییدیه‌ی اخلاقی: این مقاله از پروژه‌ی مشترک بین گروه‌های مکانیک و برق دانشکده‌ی فنی منتظری مشهد استخراج شده است.

تعارض منافع: هیچ تعارض منافعی بین عوامل مشارکت‌کننده وجود ندارد.

۶- مراجع:

- [1] Olivieri L, Tenorio JA, Revuelta D, Navarro L, Cabeza LF. Developing a PCM-enhanced mortar for thermally active precast walls. *Construction and Building Materials*. 2018 Aug 30;181:638-49.
- [2] Devaux P, Farid M. Benefits of PCM Underfloor Heating with PCM Wallboards for Space Heating in Winter. In *Thermal Energy Storage with Phase Change Materials* 2021 Jul 25 (pp. 310-327). CRC Press.
- [3] Young BA, Falzone G, Wei Z, Sant G, Pilon L. Reduced-scale experiments to evaluate performance of composite building envelopes containing phase change materials. *Construction and Building Materials*. 2018 Feb 20;162:584-95.
- [4] Akeiber H, Nejat P, Majid MZ, Wahid MA, Jomehzadeh F, Famileh IZ, Calautit JK, Hughes BR, Zaki SA. A review on phase change material (PCM) for sustainable passive cooling in building envelopes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016 Jul 1;60:1470-97.
- [5] Saffari M, de Gracia A, Ushak S, Cabeza LF. Passive cooling of buildings with phase change materials using whole-building energy simulation tools: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017 Dec 1;80:1239-55.
- [6] Liu C, Zhou Y, Li D, Meng F, Zheng Y, Liu X. Numerical analysis on thermal performance of a PCM-filled double glazing roof. *Energy and buildings*. 2016 Aug 1;125:267-75.
- [7] Du K, Calautit J, Wang Z, Wu Y, Liu H. A review of the applications of phase change materials in cooling, heating and power generation in different temperature ranges. *Applied energy*. 2018 Jun 15;220:242-73.
- [8] Peker M, Kocaman AS, Kara BY. Benefits of transmission switching and energy storage in power

- [16] Uno T, Hokoi S, Ekasiwi SN. Passive Cooling Strategies to Reduce the Energy Consumption of Cooling in Hot and Humid Climates in Indonesia. In Sustainable Houses and Living in the Hot-Humid Climates of Asia 2018 (pp. 407-418). Springer, Singapore.
- [17] Shahcheraghian A, Ahmadi R, Malekpour A. Utilising latent thermal energy storage in building envelopes to minimise thermal loads and enhance comfort. *Journal of Energy Storage*. 2021 Jan 1;33:102119.
- [۱۸] اشرفزاده، زینب و نیکپور، منصور، ۱۳۹۷، بررسی تأثیر سایبان در میزان بار سرمایشی و گرمایشی در جبهه‌های مختلف ساختمان جهت کاهش مصرف انرژی (شهر کرمان)، دومین کنفرانس ملی معماری و شهرسازی.
- [19] Yazdani, H., Pulaei, Z., Asghari, M. Energy analysis of building cooling load using canopies and thermal insulation in three warm, temperate and cold climates of Iran. *Journal of Mechanical Engineering*. 2018 123: 14-22.
- [۲۰] مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، ۱۳۹۹، مبحث ۱۹ مقررات ملی ساختمان.
- [21] Feng M, Bu X, Yang J, Li D, Zhang Z, Dai Y, Zhang X. smart windows based on photonic crystals. *Journal of Materials Science*. 2020 Jul;55(20):8444-63.
- [22] Teixeira H, Gomes MG, Rodrigues AM, Pereira J. Thermal and visual comfort, energy use and environmental performance of glazing systems with solar control films. *Building and Environment*. 2020 Jan 15;168:106474.
- systems with high renewable energy penetration. *Applied Energy*. 2018 Oct 15;228:1182-97.
- [9] Kasaeian A, Pourfayaz F, Khodabandeh E, Yan WM. Experimental studies on the applications of PCMs and nano-PCMs in buildings: A critical review. *Energy and Buildings*. 2017 Nov 1;154:96-112.
- [10] Zhou D, Zhao CY, Tian Y. Review on thermal energy storage with phase change materials (PCMs) in building applications. *Applied energy*. 2012 Apr 1;92:593-605.
- [12] Maccarini A, Hultmark G, Bergsøe NC, Afshari A. Free cooling potential of a PCM-based heat exchanger coupled with a novel HVAC system for simultaneous heating and cooling of buildings. *Sustainable Cities and Society*. 2018 Oct 1;42:384-95.
- [13] Tyagi VV, Chopra K, Kalidasan B, Chauhan A, Stritih U, Anand S, Pandey AK, Sarı A, Kothari R. Phase change material based advance solar thermal energy storage systems for building heating and cooling applications: A prospective research approach. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. 2021 Oct 1;47:101318.
- [14] Boussaba L, Foufa A, Makhoul S, Lefebvre G, Royon L. Elaboration and properties of a composite bio-based PCM for an application in building envelopes. *Construction and Building Materials*. 2018 Oct 10;185:156-65.
- [15] Reytez-Araiza JL, Pineda-Piñón J, López-Romero JM, Gasca-Tirado JR, Arroyo Contreras M, Jáuregui Correa JC, Apátiga-Castro LM, Rivera-Muñoz EM, Velazquez-Castillo RR, Pérez Bueno JD, Manzano-Ramirez A. Thermal Energy Storage by the Encapsulation of Phase Change Materials in Building Elements—A Review. *Materials*. 2021 Jan;14(6):1420.

- [28] Catalina T, Virgone J, Kuznik F. Evaluation of thermal comfort using combined CFD and experimentation study in a test room equipped with a cooling ceiling. *Building and environment*. 2009 Aug 1;44(8):1740-50.
- [29] Ning B, Chen Y, Liu H, Zhang S. Cooling capacity improvement for a radiant ceiling panel with uniform surface temperature distribution. *Building and Environment*. 2016 Jun 1;102:64-72.
- [30] Jazizadeh F, Ghahramani A, Becerik-Gerber B, Kichkaylo T, Orosz M. User-led decentralized thermal comfort driven HVAC operations for improved efficiency in office buildings. *Energy and Buildings*. 2014 Feb 1;70:398-410.
- [31] Zhang, S., Cheng, Y., Fang, Z., Huan, C. and Lin, Z., (2017). "Optimization of room air temperature in stratum-ventilated rooms for both thermal comfort and energy saving". *Applied Energy*, 204, pp.420-431.
- [23] Martín-Palma, R.J. (2009) "Spectrally selective coatings on glass: solar-control and low-emissivity coatings." *Journal of Nanophotonics*, Vol. 3, 030305.
- [24] Ragulis P, Ängskog P, Simniškis R, Vallhagen B, Bäckström M, Kancleris Ž. Shielding effectiveness of modern energy-saving glasses and windows. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 2017 Jun 21;65(8):4250-8.
- [25] Kiani GI, Olsson LG, Karlsson A, Esselle KP. Transmission of infrared and visible wavelengths through energy-saving glass due to etching of frequency-selective surfaces. *IEEE microwaves, antennas & propagation*. 2010 Jul 1;4(7):955-61.
- [26] Sun K, Tang X, Yang C, Jin D. Preparation and performance of low-emissivity Al-doped ZnO films for energy-saving glass. *Ceramics International*. 2018 Nov 1;44(16):19597-602.
- [۲۷] شاعری جلیل، یعقوبی محمود، وکیلی نژاد رزا. تأثیر شیشه هوشمند الکتروکرومیک بر بار سرمایش ساختمان‌های اداری در اقلیم گرم و مرطوب، گرم و خشک و سرد ایران. *مهندسی و مدیریت انرژی* ۱۳۹۹؛ ۱۰ (۳): ۹۹-۹۰.

بررسی تجربی تأثیر یک ربات پوشیدنی در تعادل انسان به هنگام ایستادن و راه رفتن

سید امیر حسینی سبزواری^{۱*}، مریم زارع^۲

۱- استادیار گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، مجتمع آموزش عالی گناباد، گناباد، ایران

۲- دانش آموخته مقطع کارشناسی مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، مجتمع آموزش عالی گناباد، گناباد، ایران

چکیده

در دهه‌ی اخیر، با توجه به افزایش چشمگیر طبقه‌ی سالمندان در هرم سنی بیشتر کشورهای جهان، ارتزهای پوشیدنی با اهداف توان بخشی مورد توجه محققان بسیاری قرار گرفته است. افتادن‌های ناگهانی به عنوان یکی از مهم‌ترین عوامل منجر به فوت در سالمندان شناخته می‌شود. در این مقاله، تأثیر یک ارتز پوشیدنی بر تعادل انسان به هنگام ایستادن و راه رفتن مورد بررسی قرار گرفته است. تأثیر این ارتز ساده در کاهش متابولیسم بدن هنگام راه رفتن پیش‌تر مورد بررسی محققان قرار گرفته است. در این مقاله، به بررسی تجربی اثر این ارتز بر روی تعادل افراد پرداخته شده است. برای این منظور، ارتز مورد نظر طراحی و ساخته شد. سپس یک بانک داده به وسیله‌ی نتایج حاصل از آزمایش‌های انجام شده ایجاد گردید. جهت گردآوری این بانک داده، نتایج حاصل از آزمایش‌های انجام شده به وسیله‌ی ۱۰ دانشجوی داوطلب مورد استفاده قرار گرفت. در این آزمایش‌ها، تأثیر پارامترهای مایع گوش و بینایی بر روی تعادل افراد هنگام استفاده از این ارتز بررسی و آنالیز شد. یافته‌های حاصل شده از تأثیر پارامترهای مورد بررسی بر تعادل افراد حکایت می‌کند. مطابق نتایج آزمایش‌های صورت گرفته، استفاده از ارتز فوق موجب بهبود عملکرد افراد در تعادل دینامیکی می‌شود، در صورتی که نتایج این تحقیق در تعادل استاتیکی تأثیر مشخصی را نشان نمی‌دهد.

کلمات کلیدی

ارتز پوشیدنی، تعادل، راه رفتن، ایستادن، افتادن ناگهانی.

Experimental Analysis of an Orthosis Effect on Human Balance during standing and walking

seyed amir hoseini sabzevari¹¹ , maryam zare²

1-Assistant Professor, Faculty of Engineering & Technology, University of Gonabad, Gonabad, Iran

2- Bachelor's degree in mechanical engineering, Faculty of Engineering & Technology, University of Gonabad, Gonabad, Iran

Abstract

In recent decades, due to the significant increase in the elderly in the age pyramid of most of the country, wearable orthoses have received more attention with regard to rehabilitation. Sudden falls are one of the most important factors leading to death in the elderly. In this article, the impact of an orthosis on human balance while standing and walking has been investigated. The effect of this simple orthosis in reducing body metabolism while walking has been studied. In this article, the experimental effect of this orthosis on people's balance has been investigated. For this purpose, the desired orthosis was designed and manufactured. Then a data bank was created by the results of the experiments. To compile this data, the results of the experiments conducted by 10 volunteer students were used. In these tests, ear fluid and vision indicators were analyzed on the performance of people when using this orthosis. The findings of the studies are related to the study between people. According to the results of the tests, the use of the above orthosis improves the performance of people in the dynamic body, while the results of this research on static performance do not show any effect.

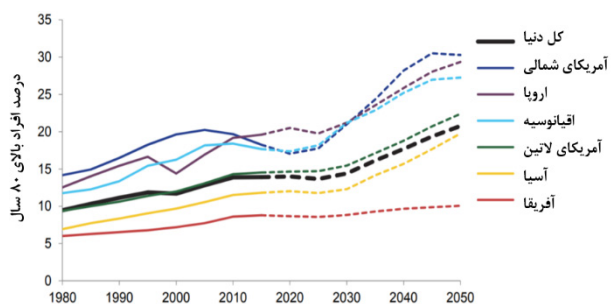
Keywords

Wearable orthoses, balance, walking, standing, sudden falls

۱-مقدمه

ارتوپدی) مورد توجه محققان قرار گرفته است. ارتزها و اگزواسکلتون‌ها به‌عنوان رایج‌ترین دسته از ارتزهای پوشیدنی توجهات بسیاری را به خود جلب کرده است [۷].

سوردیولیک و همکاران [۸] به طراحی یک ربات توان‌بخشی با هدف کمک به حفظ تعادل پرداختند. در پژوهش آن‌ها، یک ربات موازی با سیستم انتقال نیروی کابلی توسعه یافت. فتحی و نجفی [۹] اثر مدل‌سازی دینامیکی حرکت پا بر شناسایی پارامترهای مؤثر در توان‌بخشی آن را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها یک مدل ۳ درجه‌ای آزادی غیرخطی با در نظر گرفتن سفتی‌ها و میرایی‌های زاویه‌ای در مفاصل مختلف پا معرفی کردند و در [۱۰] به تحلیل پایداری و کنترل نمونه‌ی آزمایشگاهی آن پرداختند. میری‌پور و پادگرانی [۱۱] در پژوهش خود مدل ریاضی یک سیستم رباتیکی کابلی را ارائه و شبیه‌سازی کردند. مدل پیشنهادی آن‌ها با هدف توان‌بخشی بیماران دارای ناتوانی در راه رفتن توسعه یافته بود. داش‌خانه و همکاران [۱۲] به کنترل ربات‌های توان‌بخشی پا با هدف اصلاح الگوی راه رفتن بیماران پرداختند. آن‌ها توانستند موجب تأثیر و اصلاح مسیر حرکت و دوره‌ی زمانی راه رفتن بیماران شوند.



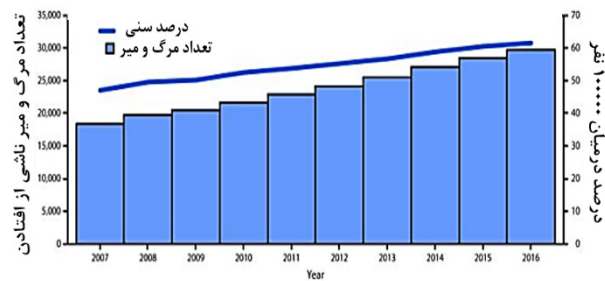
شکل ۱: درصد افراد با سن بالاتر از ۸۰ سال در نقاط مختلف جهان [۳].

با توجه به بهبود وضعیت بهداشتی و پیشرفت‌های پزشکی در دهه‌های اخیر، طبقه‌ی سالمندان در هرم سنی بیشتر کشورهای جهان رو به افزایش می‌باشد. مطابق گزارش اتحادیه‌ی اروپا ۱۷/۵٪ جمعیت این اتحادیه در سال ۲۰۱۱ مربوط به افراد بالای ۶۵ سال بوده است و پیش‌بینی می‌شود تا سال ۲۰۶۰ این نسبت به عدد ۲۹/۵٪ برسد [۱]. ۱۳/۳٪ از جمعیت کشور ایالات متحده‌ی آمریکا در سال ۲۰۱۱ را افراد بالای ۶۵ سال تشکیل داده بودند و مطابق پیش‌بینی‌ها این نسبت در سال ۲۰۴۰ به ۲۱٪ خواهد رسید [۲].

شکل ۱، نسبت افراد بالای ۸۰ سال به جمعیت کل جهان در مناطق جهان را نشان می‌دهد [۳]. پیش‌بینی سازمان بهداشت جهانی نشان می‌دهد که در سال ۲۰۵۰ حدود یک‌پنجم جمعیت جهان را افراد مسن بالای ۸۰ سال تشکیل خواهند داد. در سنین بالا، یکی از مهم‌ترین عوامل اصلی منجر به فوت در طبقه‌بندی جراحات غیرعمدی افتادن-های ناگهانی می‌باشد [۴].

از رایج‌ترین عوامل افتادن‌های ناگهانی می‌توان به حوادث طبیعی، سرگیجه‌های ناگهانی، افت فشارخون، عوامل عصبی، عدم حفظ تعادل استاتیکی و دینامیکی، حملات صرع و آرتروز اشاره نمود [۵]. شکل ۲، میزان افتادن‌های منجر به فوت را در کشور ایالات متحده‌ی آمریکا نشان می‌دهد. مطابق این داده‌ها نرخ مرگ‌ومیر ناشی از افتادن‌های ناگهانی افراد مسن در طی سال‌های ۲۰۰۷ الی ۲۰۱۶ در حدود ۳۱٪ رشد داشته است.

در دهه‌های اخیر، توجه به ارتزهای توان‌بخشی جهت کمک به حفظ تعادل به‌ویژه سالمندان (عصبی و



شکل ۲: افتادن‌های منجر به فوت افراد مسن‌تر از ۶۵ سال در کشور ایالات متحده آمریکا [۶].

می‌دهد تا با حرکت مفصل مچ پا هنگام راهرفتن، کشیده و آزاد گردد. این تغییرات در نیروی فنر به عملکرد عضله‌ی دوقلوی ساق پا و تاندون آشیل کمک می‌نماید. مطابق یافته‌های گزارش‌شده در این پژوهش، استفاده از ارتز پیشنهادی باعث کاهش ۴/۶ تا ۹/۸ درصدی در متابولیک مصرفی هنگام راهرفتن در افراد سالم در شرایط نرمال می‌شود. این کاهش مصرف متابولیک به‌طور متوسط معادل کاهش جرم چهار کیلوگرم از وزن بالاتنه‌ی هر فرد هنگام راهرفتن می‌باشد [۱۳]. از آنجایی که کالینز و همکاران تنها به بررسی کاهش متابولیک مصرفی پرداخته‌اند، در این مقاله به بررسی تأثیر استفاده از این ارتز در تعادل انسان به هنگام راهرفتن می‌پردازیم. جهت این بررسی از پروتکل استفاده‌شده در مقاله‌ی پیشین نویسندگان [۴] استفاده شده است.

در قدم ابتدایی، یک ارتز مشابه معرفی شده در [۱۳] طراحی و ساخته شد. شکل ۳ ارتز ساخته‌شده را نشان می‌دهد. ارتز ساخته‌شده دارای تنظیم اولیه بوده، با کمک سیستم کلاچ خود، کشش اولیه‌ی فنر را متناسب با هر فرد تغییر می‌دهد. جهت تنظیم کشش، از افراد خواسته شد به‌صورت نرمال بایستند، به نحوی که دو پا در کنار یکدیگر قرار بگیرد. سپس با استفاده از سیستم کلاچ، فنر در مرز شروع کشیدگی قرار می‌گیرد.

نحوه‌ی تأثیر این ارتز بر تعادل استاتیکی (سکون) و دینامیکی (راهرفتن) در این مقاله مورد بررسی قرار گرفته است. لازم به ذکر است ارتز پیشنهادی تنها بر روی یک پا نصب شده است، در صورتیکه ارتز استفاده‌شده در مقاله‌ی [۱۳] بر روی دو پا نصب شده است. پارامترهای مؤثر بر حفظ تعادل دینامیکی عبارتند از: (الف) بینایی، (ب) مایع گوش و (ج) عضلات [۴]. جهت انجام این پژوهش،

کالینز و همکاران [۱۳] در پژوهشی منحصربه‌فرد به بررسی اثر یک ربات ارتز ساده هنگام راهرفتن پرداختند. آن‌ها ثابت کردند این ارتز بدون استفاده از انرژی بیرونی باعث کاهش انرژی مصرف‌شده هنگام راهرفتن می‌شود. از دید مکانیکی، راهرفتن یک فرآیند تکراری پیچیده می‌باشد. این فرآیند شامل یک سیکل تکرارشونده بوده که با قراردادن پاشنه‌ی پای تکیه‌گاه روی زمین آغاز و با دومین برخورد همان پاشنه با زمین خاتمه می‌یابد. حسینی و امیری [۴] در یک تحقیق تجربی به بررسی اثر پارامترهای مؤثر در تعادل انسان به هنگام ایستادن و راهرفتن پرداختند.

در این پژوهش، با انجام آزمایش‌های متعدد، تأثیر یک ارتز پوشیدنی بر تعادل استاتیکی و دینامیکی انسان مورد بررسی قرار گرفته است. در قدم ابتدایی، ارتز مناسب طراحی و ساخته شد. در ادامه به نحوه‌ی اثرگذاری این ارتز بر تعادل افرادی که از آن استفاده می‌کنند مورد آزمایش قرار گرفته و نتایج آن گزارش شده است.

۲- مواد و روش‌ها

در ارتز پیشنهادی کالینز و همکاران [۱۳] یک فنر به‌صورت موازی با عضله‌ی دوقلوی پشت ساق پا استفاده شده است. سیستم مکانیکی استفاده‌شده در این ارتز این امکان را فنر

ساعت گذشته، عدم مصرف هرگونه دارو و مکمل‌های غذایی حداقل در یک هفته‌ی گذشته و دارابودن شرایط روحی مساعد. قد و وزن داوطلبین در جدول ۱ گزارش شده است.

در ادامه به تشریح آزمایش‌های صورت گرفته می‌پردازیم.

۲-۱- آزمایش استاتیکی-بینایی

از داوطلبین خواسته شد تعادل خود را با چشمان بسته بر روی یک پا حفظ نمایند. عدم تعادل در این آزمایش، استفاده از پای دوم جهت حفظ تعادل و یا حرکت خارج از محدوده جهت حفظ تعادل تعیین شده است.

۲-۲- آزمایش دینامیکی-بینایی

در این آزمایش از داوطلبین خواسته شد یک مسیر ۱۲ متری را با چشمان بسته طی نمایند. عدم تعادل در این آزمایش، خروج از مسیر مشخص شده حین راه رفتن تعیین شده است. لازم به ذکر است داوطلبین جهت آشنایی عصبی عضلانی با مسیر، قبل از شروع آزمایش مسیر را با چشمانی باز طی کرده بودند. در صورتی که انحراف داوطلبین از مسیر حرکت با شیب زیاد، ضمن مداخله در آزمایش افراد به مسیر بازگردانده می‌شدند.

۲-۳- آزمایش استاتیکی-مایع گوش

در این آزمایش، داوطلبین ابتدا ۱۰ دور با سرعت متوسط به خود چرخیدند. سپس سعی نمودند تعادل خود را در محدوده‌ی مشخص روی یک پا حفظ نمایند. به محض برهم خوردن تعادل، از داوطلبین درخواست شد بدون وقفه به آزمایش ادامه دهند.

۱۰ دانشجوی آقای مجتمع آموزش عالی گناباد انتخاب شدند. افراد داوطلب سالم و بدون سابقه‌ی بیماری خاص یا معلولیت و با میانگین سنی 20 ± 2 بودند. مطابق یافته‌های گزارش شده در [۴]، با توجه به وضعیت جسمانی آزمودنی‌ها، خستگی عضلات پا تأثیر مشخصی بر تغییر تعادل دینامیکی و استاتیکی افراد جوان ندارد؛ لذا در ادامه تنها به بررسی دو پارامتر بینایی و مایع گوش پرداخته شده است.



(ب)

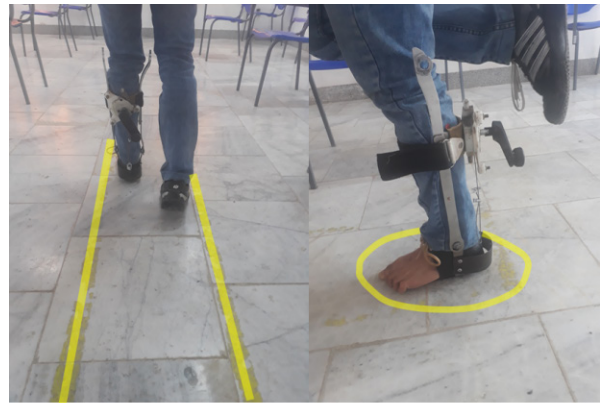
(الف)

شکل ۳: ارتز استفاده شده (الف) در مقاله [۱۳]، (ب) ارتز استفاده شده در این پژوهش.

دانشجویان داوطلب پس از اطلاع از شرایط تحقیق و امضای فرم رضایت‌نامه با مراحل انجام آزمایش‌ها آشنا شدند و توضیحات مختصری در مورد ماهیت و چرایی آزمایش‌ها به آنان ارائه شد. شرایط دانشجویان داوطلب جهت مشارکت در این مطالعه شامل موارد زیر بود: عدم ابتلا به بیماری‌های عصبی-عضلانی، عدم ابتلا به اختلالات بینایی شدید اصلاح نشده، عدم سابقه‌ی آسیب در اندام تحتانی در سه ماه گذشته و عدم عضویت در تیم‌های ورزشی دانشگاه. همچنین شرایط رعایت شده توسط داوطلبین قبل از انجام آزمایش‌ها شامل موارد زیر بوده است: عدم انجام فعالیت ورزشی حداقل در ۲۴

۴-۲- آزمایش دینامیکی-مایع گوش

در این مرحله، پس از آنکه داوطلبین ۱۰ دور با سرعت متوسط گردش به دور خود داشتند، یک مسیر ۱۲ متری را با چشمان باز طی نمودند.



(ب)

(الف)

شکل ۴: آزمایش‌های انجام‌شده، الف) آزمایش استاتیکی-بینایی، ب) آزمایش دینامیکی-مایع گوش.

در آزمایش استاتیکی- بینایی، از داوطلبین خواسته شده بود به مدت ۱۸۰ ثانیه تعادل خود را حفظ نمایند. متوسط مجموع زمانی که افراد موفق به حفظ تعادل خود نشدند، در جدول ۲ گزارش شده است. مطابق داده‌های گزارش‌شده در این جدول، استفاده از ارتز باعث کاهش تعادل استاتیکی-بینایی به میزان ۶/۴٪ شده است. لازم به ذکر است با توجه به وضعیت جسمانی و سنی داوطلبین، انتظار می‌رود این افزایش عدم تعادل در دیگر گروه‌های سنی به مراتب بیشتر باشد.

جدول ۲: نتایج آزمایش تعادل استاتیکی-بینایی.

میانگین		آزمایش استاتیکی-بینایی
با استفاده از ارتز	بدون استفاده از ارتز	
۳۳/۹	۲۲/۴	عدم حفظ تعادل (ثانیه)
۱۸/۸	۱۲/۴	عدم حفظ تعادل (درصد)

در جدول ۳، نتایج حاصل از آزمایش تعادل دینامیکی- بینایی گزارش شده است. متوسط بازه‌ی زمانی که داوطلبین هنگام طی مسیر از آن منحرف شده بودند، به‌عنوان کمیت نشان‌دهنده‌ی عدم تعادل در نظر گرفته شده است. مطابق داده‌های این جدول، استفاده از ارتز باعث افزایش تعادل دینامیکی-بینایی شده است. در طی آزمایش مشخص شد که پوشیدن ارتز بر پای غالب یا غیرغالب می‌تواند در نتایج نهایی تأثیر داشته باشد، هرچند اعلام نظر در این مورد نیازمند آزمایش‌های بیشتر مطابق پروتکل‌های دقیق‌تری می‌باشد.

۳- نتایج و یافته‌ها

میانگین مشخصات داوطلبین در جدول ۱ نشان داده شده است. با توجه به انتخاب داوطلبین از میان دانشجویان، سن شرکت‌کنندگان در یک بازه‌ی محدود توزیع شده است.

جدول ۱: میانگین آماری مشخصات فردی شرکت‌کنندگان

شاخص	میانگین ۱۰ داوطلب
سن (سال)	۳/۲۰
قد (متر)	۱/۷۵
وزن (کیلوگرم)	۶۸/۵۶
نمایه‌ی توده‌ی بدن (کیلوگرم بر مترمربع)	۲۲/۳۸

تمامی چهار آزمایش در دو حالت: استفاده از ارتز و بدون استفاده از آن انجام شده است و نتایج با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

طی کردند، در صورتی که این مقدار با استفاده از ارتز ۳۱/۸ درصد بوده است؛ لذا استفاده از ارتز موجب بهبود ۱۰ درصدی در افزایش تعادل دینامیکی-مایع گوش می شود. مطابق انتظار، داوطلبین غالباً از سمت پای غالب خود از مسیر خارج شده اند. مقایسه‌ی داده‌های جدول ۴ و ۵ نشان می دهد اگرچه استفاده از ارتز در تعادل استاتیکی-مایع گوش تأثیر چندانی ندارد، اما باعث بهبود تعادل در تعادل دینامیکی-مایع گوش می گردد.

جدول ۵: نتایج آزمایش تعادل دینامیکی-مایع گوش.

میانگین		آزمایش دینامیکی-مایع گوش
با استفاده از ارتز	بدون استفاده از ارتز	
۳۱/۸۰	۳۵/۶۰	عدم حفظ تعادل (درصد)
۴	۴/۷	دفعات خروج از مسیر راست
۲/۵	۳/۶	دفعات خروج از مسیر چپ

۴- نتیجه گیری

نتایج گزارش شده در [۱۳] و نتایج حاصل از این پژوهش نشان می دهد استفاده از ارتز پوشیدنی بدون هیچ گونه منبع نیرویی خارجی علاوه بر کاهش متابولیسم بدن هنگام راه رفتن، به افزایش تعادل بدن هنگام راه رفتن (تعادل دینامیکی) کمک می کند. بهبود ایجاد شده در ارتز پیشنهادی که از یک فنر به موازات عضله دوقلوی ساق پا استفاده می کند، اهمیت نیاز به تقویت این عضله و تأثیر شگرف آن به ویژه در متابولیسم راه رفتن را نشان می دهد. لازم به ذکر است نتایج این تحقیق وابسته به شرکت کنندگان داوطلب در بازه‌ی سنی و جنسی مشخصی می باشد؛ لذا جهت تعمیم یافته‌های این پژوهش به دیگر گروه‌های سنی نیاز به آزمایش‌های بیشتری می باشد.

جدول ۳: نتایج آزمایش تعادل دینامیکی-بینایی.

میانگین		آزمایش دینامیکی-بینایی
با استفاده از ارتز	بدون استفاده از ارتز	
۲۰/۴۷	۲۵/۱۲	عدم حفظ تعادل (درصد)
۱/۹	۲/۵	دفعات خروج از مسیر راست
۱/۳	۲	دفعات خروج از مسیر چپ

مقایسه‌ی داده‌های جدول‌های ۲ و ۳ نشان می دهد استفاده از ارتز موجب بهبود اثر پارامتر بینایی در تعادل دینامیکی می شود، در صورتیکه در تعادل استاتیکی اثر معکوس دارد. نتایج آزمایش مربوط به تعادل استاتیکی-مایع گوش در جدول ۴ نشان داده شده است. میانگین زمانی که داوطلبین در مدت ۶۰ ثانیه آزمایش از تعادل برخوردار نبودند، در این جدول گزارش شده است. استفاده از ارتز اگرچه موجب افزایش زمان عدم تعادل شده است، اما مقادیر گزارش شده تغییر محسوسی را نشان نمی دهد.

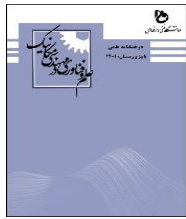
جدول ۴: نتایج آزمایش تعادل استاتیکی-مایع گوش.

میانگین		آزمایش استاتیکی-مایع گوش
با استفاده از ارتز	بدون استفاده از ارتز	
۹/۱	۸/۸	عدم حفظ تعادل (ثانیه)
۱۵/۱	۱۴/۶	عدم حفظ تعادل (درصد)

در جدول ۵، داده‌های مربوط به اثر پارامتر مایع گوش بر روی تعادل دینامیکی نشان داده شده است. مطابق این جدول، هنگامی که داوطلبین از ارتز استفاده نکرده اند، ۳۵/۶ درصد از مسیر را در خارج از محدوده‌ی مشخص شده

۵-مراجع

- [8] D. Surdilovic, A new wire robotic system for gait rehabilitation, Proceeding of the ICORR, 2003.
- [9] M. Fathi, F. Najafi, Dynamic modeling of the human lower limb interacting with a pneumatic Actuator and its parameters identification for rehabilitation, Modares Mechanical Engineering, Vol. 13, No. 13, pp. 200-213, 2014.
- [10] M. Fathi, F. Najafi, Admittance control stability analysis of a lower limb rehabilitation servo-pneumatic system, Modares Mechanical Engineering, Vol. 15, No. 6, pp. 257-268, 2015.
- [11] B. Miripour Fard, T. Padargani, Controllable workspace generation for a cable-driven rehabilitation robot using neural network and based on patient's anthropometric parameters, Modares Mechanical Engineering, Vol. 15, No. 3, pp. 137-145, 2015.
- [12] M. Mohammadi Moghadam, A. Dashkhaneh, M. R. Hadian, M. Mogharrabi, A. Mirzaei Saba, S. M. Davodi, Rehabilitation robots control in gait training exercises on a treadmill, Modares Mechanical Engineering, Vol. 14, No. 8, pp. 157-164, 2014.
- [13] S. H. Collins, M. B. Wiggin, G. S. Sawicki, Reducing the energy cost of human walking using an unpowered exoskeleton, Nature, Vol. 522, No. 7555, pp. 212-215, 2015.
- [1] E. C. Eurostat, Population structure and ageing, European Commission: Luxembourg, 2014.
- [2] United Nations, Population Division. World population prospects, Department of Economic and Social Affairs, 2015.
- [3] United Nations, World Population Ageing, Department of Economic and Social Affairs, 2015.
- [4] S. A. Hoseini Sabzevari, E. Amiri, Experimental analysis of effective parameters on human balance during standing and gaiting, Journal of Solid and Fluid Mechanics, Vol. 8, No. 1, pp. 51-57, 2018. (in Persianفارسی)
- [5] D. A. Winter, Human balance and posture control during standing and walking, Gait Posture, Vol. 3, No. 4, pp. 193-214, 1995.
- [6] E. Burns, R. Kakara, Deaths from falls among persons aged ≥ 65 years, Morbidity and Mortality Weekly Report, Vol. 67, No. 18, pp. 509-517, 2016.
- [7] H. Herr, Exoskeletons and orthoses: classification, design challenges and future directions, Journal of neuroengineering and rehabilitation, Vol. 6, No. 1, pp. 21-28, 2009.



Increasing the stability of nanofluids and its estimation methods

Bahman Rahmatinejad ^{1*}, Farzin Azimpour ²

1. PhD, Department of Mechanical Engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran.

2. Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran.

Abstract

Nanoparticles are materials which have at least one of their dimensions (period, width, peak) (length, width, height) at the nano scale (among 1 and 100 nm). Nanofluids are obtained from the distribution of particles with nano dimensions in normal fluids. Common fluids such as water, oils and ethylene glycol, which are usually used in heat transfer, have limited ability in terms of thermal properties. The interesting properties of nanofluids (such as high heat transfer coefficient) and the great potential they show for increasing heat transfer have caused this group of fluids to be in the focus of researchers' attention in recent years. One of the key factors in optimizing the properties of these fluids is their stability. The gathering of particles and their agglomeration increases the possibility of sedimentation, reduces the stability of the suspension, and causes the loss of the properties of the suspension, such as thermal conductivity, viscosity, and increase in heat capacity. In this research, methods of increasing stability and inspection tools were investigated. The results showed that the simultaneous use of ultrasonic vibration and surface activating substances (surfactant) has a significant effect on the stability of nanofluid. And two methods of using DLS light scattering and ultraviolet-visible absorption spectrometry have been used by many researchers in their research in order to check stability.

Keywords

Nanofluid, nanoparticles, nanofluid stability, estimation of nanofluid stability.

Introduction

The interesting properties of nanofluids (such as high heat transfer coefficient) and the great potential they show for increasing heat transfer have caused this group of fluids to be the focus of researchers' attention in recent years. But the main problem of these fluids is their long-term sustainability. Which has limited their use in industrial applications. In this research, methods of increasing stability as well as methods of controlling stability are discussed. Due to the lack

*: Corresponding author, brahmatai@tvu.ac.ir

of similar studies comprehensively in this regard and on the other hand, the presentation of conflicting results by the researchers in this case caused this research to be carried out.

Methods of increasing the stability of nanofluids

Preparation of uniform and stable suspension has a significant effect on improving the thermal properties of nanofluid. One of the things that affects the stability of nanofluid is the phenomenon of cluster formation or accumulation of particles, which causes these particles to settle. The phenomenon of clustering may have a negative effect on nanofluid in two ways. This phenomenon may cause instability of the suspension by creating large masses and also by creating empty areas of nano-particles in the liquid and increasing the thermal resistance, it causes a decrease in heat transfer.

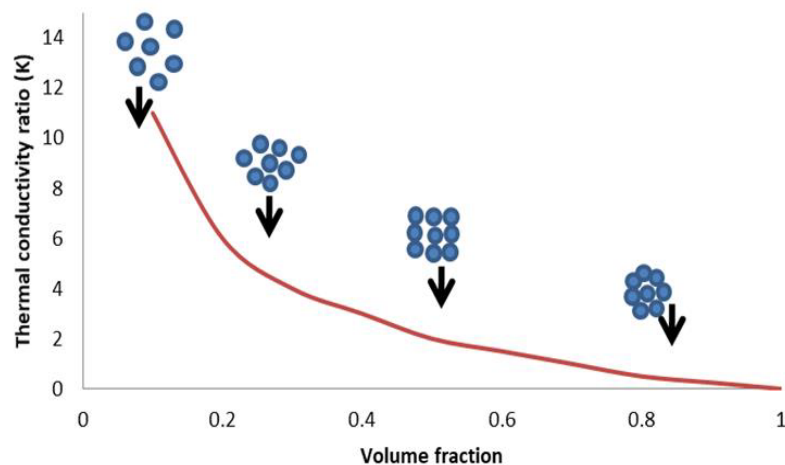


Figure 1: Effect of clustering and volume percentage on thermal conductivity coefficient

Figure 1 shows the effect of clustering and volume percentage on thermal conductivity coefficient. It is known that there is a possibility of clustering with the increase in volume percentage of nanoparticles. Also, the more the nanoparticles become clusters, the thermal conductivity coefficient will decrease. To increase stability in nanofluids, the following methods can be used.

- ❖ Using electric stirrer and magnetic stirrer
- ❖ Using ultrasonic vibration
- ❖ Adding surface activators (surfactants)
- ❖ PH Changing

Nanofluid stability inspection tools

The main disadvantage of nanofluids, which has limited their use, is the unwillingness to disperse homogeneously in the liquid phase. Therefore, the discussion of the stability of nanofluids is very important. The following methods are used to accurately estimate the relative stability of nanofluids.

- ❖ Photographing the deposition of nanoparticles
- ❖ Applying an external gravitational field to prevent nanoparticles from settling
- ❖ UV-Vis spectrophotometry
- ❖ Sediment balance method
- ❖ Zeta potential test
- ❖ Use of TEM and SEM images

- ❖ Using DLS light scattering
- ❖ Using a spectrophotometer
- ❖ Using the 3ω method

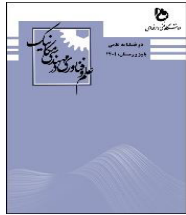
Results and Discussion

One of the key factors in optimizing the properties of Nano fluids; It is a matter of sustainability. The gathering of particles and their agglomeration increases the possibility of sedimentation, reduces the stability of the suspension, and causes the loss of the properties of the suspension, such as thermal conductivity, viscosity, and increase in heat capacity. Different methods have been introduced to increase the stability of nanofluids, and the results of examining different sources showed that the simultaneous use of ultrasonic vibration and surface activating substances (surfactant) has a significant effect on the stability of nanofluids. Also

, in order to check the stability of nanofluid, two methods of DLS light scattering and ultraviolet-visible absorption spectroscopy are used in different sources.

Conclusions

The new technology of using nanofluids has created bright horizons in heat transfer studies. But the main problem of these fluids is their long-term sustainability. which has limited their use in industrial applications. The stability of nanoparticles in the base fluid has a significant effect on improving heat transfer. increased heat transfer; It has the advantage of equipment miniaturization. which also saves energy. Therefore, nanofluid is economically very affordable compared to basic fluids. Different chemical and physical methods have been proposed to stabilize the suspension, among which can be mentioned the change of acidity, the use of surfactants, and ultrasonic vibration.



Mechanics, Vol 1, Issue 1, 1401

Journal of Science and Technology in Mechanical Engineering

DOI: [10.22034/stme.1401.162636](https://doi.org/10.22034/stme.1401.162636)



Numerical Analysis of Blood Interaction in a Vessel with a Flexible Wall

Naser Kordani^{1*}, Hasan Khodayari², Rasool Mohammadi Abokheili³

1. Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering & Technology, University of Mazandaran, Babolsar, Iran

2. MSc, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering & Technology, Nour Islamic Azad University, Nour, Iran

3. MSc/Student, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering & Technology, University of Mazandaran, Babolsar, Iran

Abstract

Heart attack and stroke are the leading causes of death in the world. Often the main reason for this phenomenon is the clogging of arteries. Eclipse is tiny abnormal and abnormal vessels or other tubular structures in the body organs. This project aims is analyzing the flow in the artery-clogging effects. In the present study, unsteady flow and flow developed before is completely eroded. After parsing several different models, the Careau model is considered for the simulation of non-Newtonian fluid in the blood. Vessel model for validation of simulation data is selected from the valid article and the results show the approximate accuracy of the non-Newtonian model is used. The following research vessels of different sizes Eclipse model is analyzed. When the output is narrowing, the vessels have been strongly accelerating, and up to 12%, faster dilemma can be seen. However, the software cannot simulate tears. However, the power of the threshold of bearing pressure on the wall tissue suggests that up to 50 percent of the eclipse diameter is tolerable. Pressure values in the vessels by flooded 80 percent of the inner diameter with Eclipse reflect the diversity of pressure and speed with high intensity within the veins that causes in areas near Eclipse values of shear stress to increase the flow considerably, vessel wall under pressure.

Keywords

Non-Newtonian Fluid, CAREUA Model, Numerical Analysis, ANSYS, Blood

*: Corresponding author, naser.kordani@umz.ac.ir

Full Abstract

A thrombus is an abnormal narrowing of a vessel or other tubular structure in the body. In fluid mechanics, clogging indicates the presence of an obstacle in the way of blood flow inside the vessel. Vascular branches in the parts that have unusual fluid dynamics are known as places prone to atherosclerosis. Fluid mechanics studies show that atherosclerosis occurs in bifurcations with complex geometry (in areas with high Reynolds numbers and shear stress lower than the average shear stress of the wall). The flow pattern is related to non-uniform shear stress and wall curvature. In addition, local disorder and circulation areas play an essential role in the initiation and development of atherosclerosis. The complexity of the dynamics of the blood flow downstream of the occlusion will cause further development of the occlusion or will cause the vulnerability of the plaque to fracture and the phenomenon of thrombosis. Clogging or narrowing of the blood artery will face various hemodynamic consequences of pressure drop, which leads to the development of clogging. Pressure drop depends on flow velocity and blockage geometry, but fluid properties such as density and apparent viscosity are relatively constant. Arteries with multiple blockages result from plaque growth in atherosclerosis, which may collapse under certain physiological conditions. The collapse of the inner wall of the vessel is a process under which the bending of the artery is under certain pressure and tension. In these conditions, the collapse of the inner wall of the vessel occurs. The result of compaction resulting from this collapse will be to accelerate the process of fatigue and rupture. If the plaque separation occurs in the coronary and cerebral arteries, it directly leads to a heart attack and stroke. Clogging develops when the plaques adhere to each other, and when the flow is sufficiently constricted, the turbulence may increase and raise the shear stress of the flow and the walls. For healthy vessels, the blood flow is usually laminar ($Re < 1000$), but in the presence of occlusion, sufficient turbulence can be produced during the cardiac cycle. Therefore, it is vital to predict the state of flow when the simulation is performed in blood vessels with occlusion.

The purpose of this paper is to analyze the non-Newtonian blood fluid in the vessel. In the present study, the flow is unsteady and fully developed before entering. The Carreau model is considered for the simulation of non-Newtonian fluid of blood. Also, the values of speed and pressure are given as the existing reality and with pulses.

The equations governing the problem are divided into two parts. The first part is the equations related to the fluid, which include the equations of conservation, momentum, and turbulence. The other part is the governing equations of the solid wall interacting with the fluid. Ansys software has been chosen for simulation. The equations solved in the software include the equations of conservation of mass and momentum.

The beat is selected as a pulse, and because the Fluent software cannot define this type of beat, the codes defined by the user for the system are defined separately. The geometry of the vessel, which includes a crossroads with an outlet diameter two times the inlet diameter, is drawn, and before the intersection, the blockage is tested and compared with different percentages. To create more tension in the vessel and complicate the problem, the diameter of one of the outlets is reduced by half, and the results are compared. This sophistication enables us to solve similar problems and analyze the output information. Different models are available to define the blood fluid in the software. The selected models include Carreau, non-Newtonian Power-law and Newtonian Power-law, and, the Carreau model has the slightest error compared to the analytical solution. Numerical analysis was done using a commercial code of Ansys, software for analysis. For simulation, the desired model is first drawn in Catia software and then gridded in Gambit software. In the next step, this gridded model is entered into the Ansys

software, and after giving the values of the boundary conditions and determining the solution method, it is analyzed.

The desired geometry is drawn in the design software. Fig. 1 shows the drawn geometry.

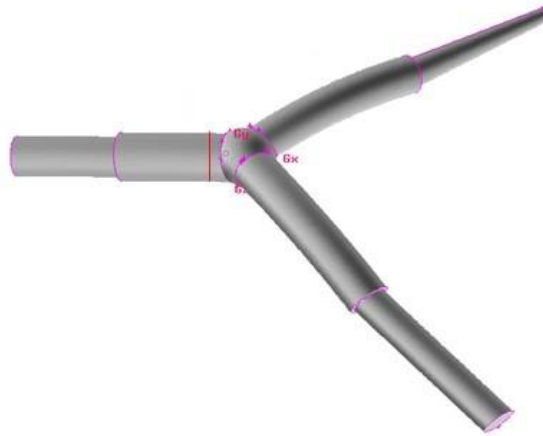


Fig. 1. Geometry of vessel

The number of generated mesh is 524,000 elements. To correctly determine the number of elements, independence from the network was investigated, and convergence was established. In Fig. 2, a view of the generated mesh can be seen.

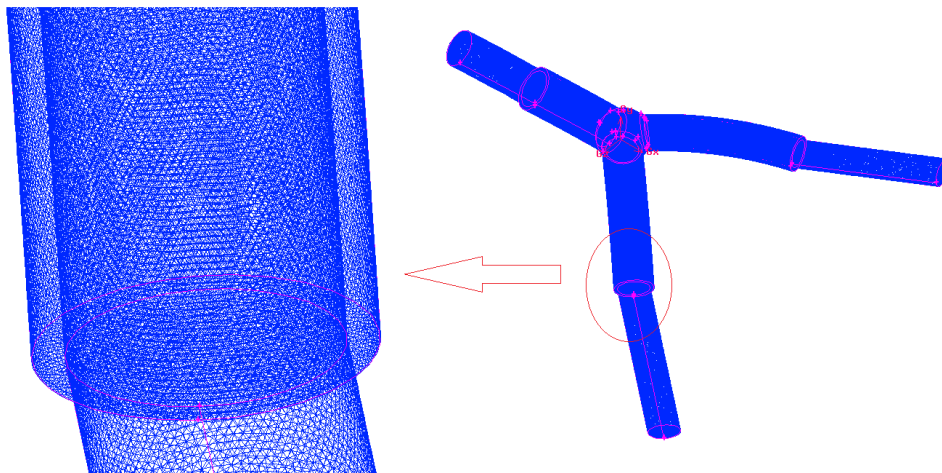


Fig. 2. View of the generated mesh

For numerical analysis in Fluent software, it is necessary to give boundary conditions. The boundary condition of the non-slip body is assumed. Modeling of the inlet flow has been done using the mass flow rates used in the reference. The outlet pressure boundary condition is also used for two vessel outlets. Since the solution is unsteady, the User-defined function has been used to give the input and output boundary conditions. In Fig. 3, a view of the desired geometry along with the boundary conditions, and in Fig. 4, the values given by the reference can be seen.

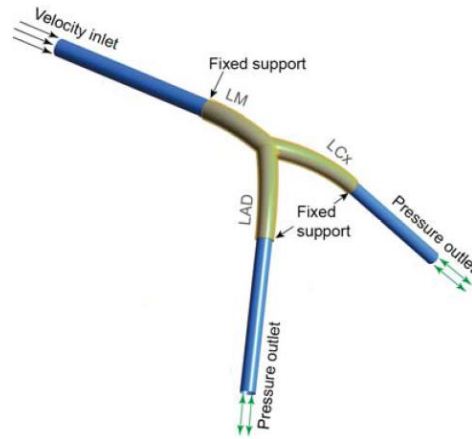


Fig. 3. Geometry of vessel with boundary conditions

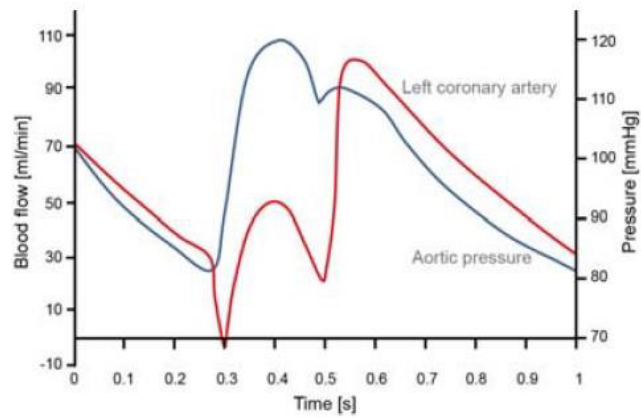


Fig. 4. Input and output values of blood flow according to time

To analyze the fluid-structure interaction, the dynamic mesh method is used in Ansys software. In this method, the effect of the fluid on the wall and its changes are obtained using the diffusion or penetration method.

In Fig. 5, the generated geometry is given for half-diameter vessel blockage. In this simulation, the eclipse is assumed to be circular.

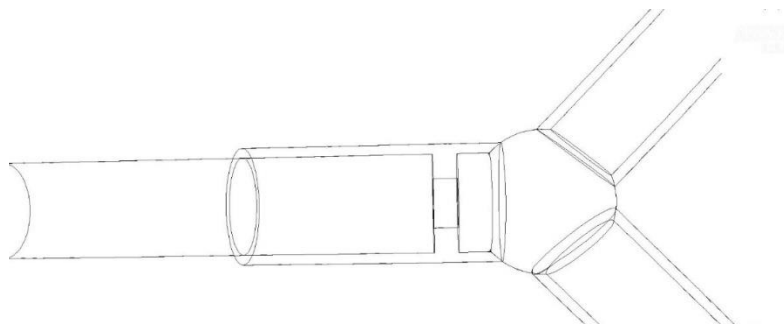


Fig. 5. Vessel geometry with occlusion of fifty percent of vessel diameter

Fig. 6 shows the shear stress values of the vessel wall and Fig. 7 shows the intravascular pressure, which are the results of the analysis of this article.

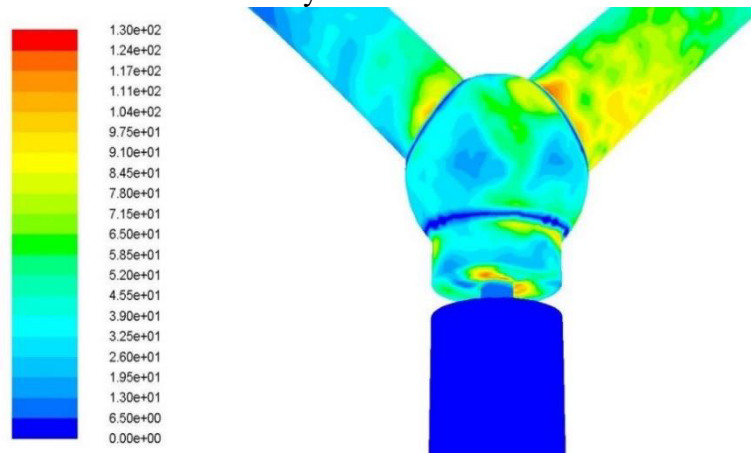


Fig. 6. Shear stress values on the vessel wall with 80% occlusion and 50% outlet narrowing

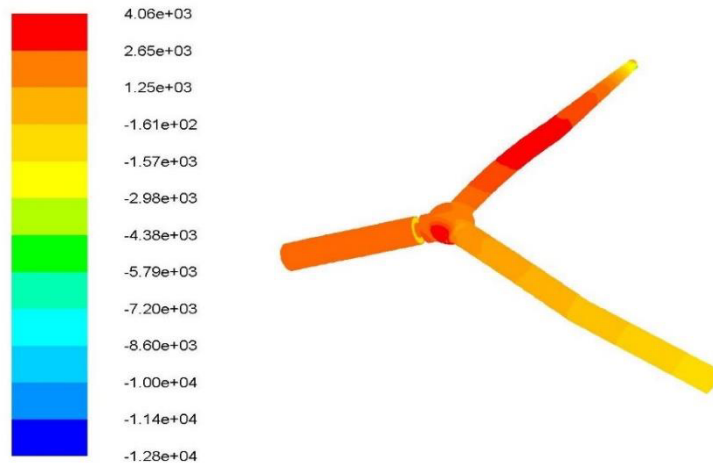
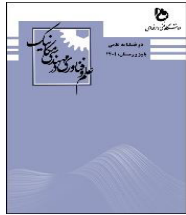


Fig. 7. intravascular pressure

In this article, the eclipse is assumed to be circular. The deformation of the wall mesh due to pressure has shown that the wall tissue will not be able to withstand the pressure in severe blockages and will be on the verge of tearing. Also, the pressure effect inside the tissue of the vessel wall is evident. For small amounts of occlusion, the large vessels will bear the pressure. Although the software cannot simulate rupture, the strength of the pressure tolerance threshold of the wall tissue indicates that it can tolerate up to 50% of the blockage diameter. The pressure values in the vessel with a blockage of 80% of the internal diameter and a narrowed outlet indicate a high intensity and pressure heterogeneity inside the vessel, which causes the shear stress values to increase significantly in the areas near the blockage, and the flow, the vessel wall put pressure on. The deformation of the wall network due to this pressure has shown that, the wall tissue will not bear this amount of pressure and will be on the verge of tearing. Velocity values inside the vessel are given for different modes of analysis. In the area before the blockage due to the increase in pressure, the flow faces a sharp drop in speed. This increase in speed continues to the intersection area, which causes an increase in friction and shear stress. In the case where the outlet of the vessel is narrowed, the speed increases, and up to 12% more speed is observed in the intersection area. In this case, the tissue of the wall will not bear this amount of pressure and will be on the verge of tearing.



Mechanics, Vol 1, Issue 1, 1401

Journal of Science and Technology in Mechanical Engineering

DOI: [10.22034/stme.2022.162700](https://doi.org/10.22034/stme.2022.162700)



Effects of vibrator characteristics on unclogging and outflow of silo containing granular material-DEM approach

Akbar Jafari^{1*}, Ali Abolghandi² and Arash Gharibi²

1. Department of Mechanical Engineering, Technical and Vocational University, Tehran, Iran.

2. Faculty of Mechanical Engineering, Sirjan University of Technology, Sirjan, Iran.

Abstract

Silo is one of the widely used devices in many industries including mining, chemical, pharmaceutical and agriculture. The outflow regime of this device is influenced by different variables including its geometrical features, type and size of particles and application of flow aid equipment. In this research, Discrete Element Method has been used to simulate and study the effects of vibrator characteristics on the outflow of a silo containing granular materials. To ensure the simulations accuracy, sensitivity analysis on the numerical solution factors was performed. Furthermore, for validation, comparisons with experimental and numerical results reported in the open literature have been made. Based on the simulations results and also realistic observations, for a certain size of the silo outlet, which is called critical state here, and of course smaller than that, the silo will be blocked. Adequate numerical studies were carried out on three supercritical, critical and non-critical states. Numerical studies have been done for different values of the vibration frequencies and amplitudes. In addition, relevant simulations were conducted to figure out effect of the vibrator location on its anti-blocking performance. The obtained results were discussed to explain probable physical reasons for the influence of the studied variables.

Keywords

Silo; Blockage; granular material; DEM.

* : Corresponding author, a_jafari@tvu.ac.ir

Introduction, theory and formulation

Jamming of the outlet is a common problem in many silos, which occurs for various reasons, such as the locking of particles to each other, the formation of arche in the funnel, or the adhesion of particles. Various researches with theoretical and experimental approaches have been conducted to study and find possible solutions for this problem. In the current research, discrete element method is employed to study effects of the vibrator characteristics on the silo blockage and outflow.

In a system with N particles, the position, velocity and forces between the particles are known at the time t_0 . By integrating the following Newton's equations of motion, the position and velocity of all particles at time t_1 are obtained. By repeating this process, a complete set of information about the position, speed, acceleration and energy of each particle, versus the time, are orbited.

$$\frac{\partial^2 r_i}{\partial t^2} = \frac{1}{m_i} F_i(\vec{r}_j, \vec{v}_j, \varphi_j, \omega_j) \quad , \quad (i, j = 1, \dots, N) \quad (1-a)$$

$$\frac{\partial^2 \varphi_i}{\partial t^2} = \frac{1}{J_i} \vec{M}_i(\vec{r}_j, \vec{v}_j, \varphi_j, \omega_j) \quad , \quad (i, j = 1, \dots, N) \quad (1-b)$$

In the above equations, $\vec{F}_i$ and $\vec{M}_i$ are respectively the force and moment on the i th particle. m_i and J_i are its mass and moment of inertia are, respectively. The forces and moment are related to the position, $\vec{r}_j$, orientation, φ_j , linear velocity, $\vec{v}_j$, and angular velocity, ω_j . It should be noted that $\vec{F}_i$ is summation of all forces due to contacts of i th particle with the other particles and the device walls. Here, Kelvin-Hertz viscoelastic model is employed to estimate the contact force. Based on this model, the collision force is obtained using the following equation. In fact, the force depends on the equivalent Young's modulus, E^* , equivalent radius, R^* , the particles deformation, ξ , the speed of the collision, $\dot{\xi}$, and the internal damping, η [1].

$$F^n(\xi, \dot{\xi}) = \frac{4E^* \sqrt{R^*}}{3} \left(\xi^{\frac{3}{2}} + \eta \sqrt{\xi} \dot{\xi} \right) \quad (2)$$

It is obvious that due to the large number of governing differential equations, it is not possible to solve them analytically and they must be solved numerically. Here, the prediction-correction algorithm (Gear) is used for numerical integration. Open source program LIGGGTHS which is actually an improved version of Lamps program [2] was used to run computer simulations conducted under Linux operation system.

Solution and implementation method

As shown in Fig. 2, the wall of the silo funnel is divided into five areas, harmonic excitation is entered into one of the parts to study effects of the vibrator location. The particles are spherical grains made of glass, whose specifications are based on the reference [3]. Obviously, by reducing of the silo outlet size, the blockage probability increases, so the size threshold at which the silo is blocked is called the critical size. Here, based on the simulation results of silos with different outlet sizes, the critical size was obtained. In this research, for critical, supercritical (jammed) and non-critical outlet sizes simulations have been performed. The vibration excitation is by harmonic excitation with the function $x = A \sin \omega t$, where A is the amplitude, ω is its circular frequency, and $f = \frac{\omega}{2\pi}$ is its frequency.

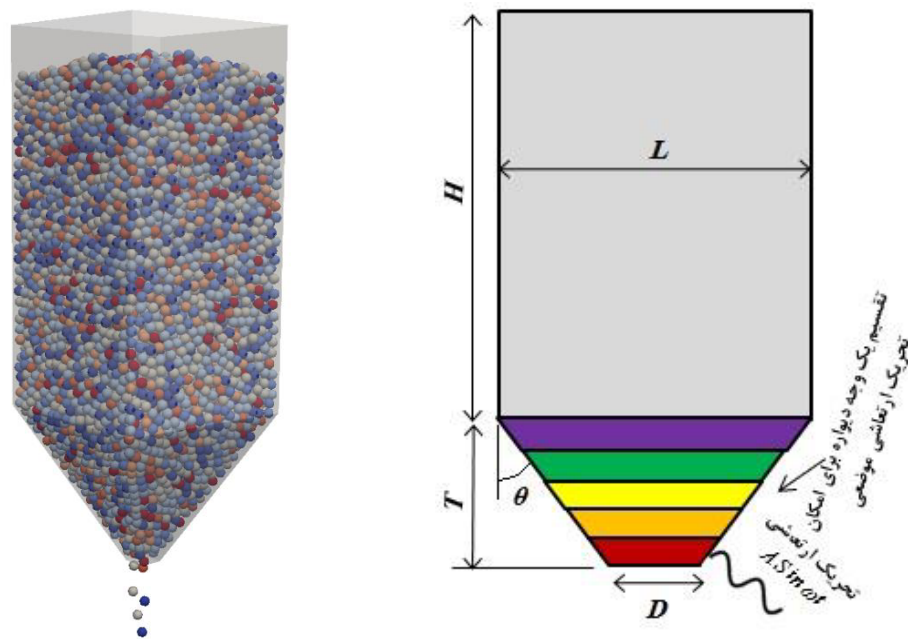


Fig. 2. Schematics of the silo, division of the funnel wall and a snapshot of the simulation.

Effects of the vibration amplitude, frequency and location

In fact, the vibration amplitude indicates the amount of silo wall movement, which causes the adjacent particles to move. It was seen that increasing the vibration amplitude in the supercritical silo leads to the improvement of the unjamming effect, however, with the increase in the frequency, the difference between the results of different amplitudes is reduced. On the other hand, by increasing the size of the silo opening and in the non-critical silo, there is basically no significant difference between the effect of different amplitudes, and even by increasing the amplitude after a certain limit, there is a negative effect on the discharge rate. In terms of physical interpretation, it can be said that by increasing the vibration amplitude, more displacement is introduced to the adjacent particles and the chance of the adhesion and arch decreases. Nevertheless, an excessive increase in the vibration amplitude can push the particles upwards and the results of two positive and negative effects leads to diminish effect of the vibration.

In terms of the effect of the vibration frequency, it can be said that increasing the frequency increases the supercritical silo discharge rate. However, for the non-critical silo, there is no significant difference between the effect of different frequencies. In terms of physical interpretation of these results, we can point to the fact that with the increase in the frequency, the energy of the wave is increased, and accordingly, the energy transferred to the particles near the silo wall is also increased. This energy can overcome the adhesion of particles and prevents the blockage and enhance the flow consequently. However, it must be insisted that in the conditions that the silo is non-critical, the share of the vibration energy into the kinetic energy of the overall flow is not significant, so it does not have considerable effect on the discharge rate.

Regarding effect of the vibrator location, it was seen that if the vibrator installed closer to the outlet, its positive effect on the discharge rate increases. Regarding the physical reason of such behavior, it can be said that when vibration enters near the exit, its energy effectively moves the locked particles at that region and intensify the flow. On the other hand, when the vibration enters at a higher elevation, its energy is distributed within a wider region leading to weakening its impact on the particles flow.

Conclusion

In this research, the effect of vibration of the silo walls on its discharge was studied using the discrete element method. In order to ensure the accuracy of the simulations, a time step sensitivity analysis was performed. Also, the height of the load was chosen big enough to maintain stable conditions in the silo discharge. To validate the methodology, a comparison was made with numerical and experimental results reported in related references. A silo that is discharged spontaneously without vibration is called non-critical, and by reducing the size of the outlet, it reaches the blockage threshold, which is called critical. When the size of the opening is smaller than this limit, blockage occurred and it was called supercritical state. Numerical studies were carried out on the three introduced modes and it was found that vibration has a significant effect on the blockage presentation and increasing the discharge rate of critical and super-critical silos, while its use in non-critical silos has negligible effect. Based on the numerical results, increasing the vibration amplitude until reaching an optimal value leads to an increase in the discharge rate, but after that it decreases. It was also found that by increasing the vibration frequency the discharge rate is improved, however, this trend decays gradually. In addition, it was found that the closer the vibrator location to the outlet, the more its positive effect on the discharge rate. It seems that vibration mechanical energy causes breaking bonds and adhesion between particles and unjamming consequently. In practical viewpoint, it is suggested that the silo critical level be identified and if it is super critical or critical, the vibrator installation is recommended. Nevertheless, there is no definite setting for the vibration frequency and amplitude (stimulation force), and its optimal setting should be adjusted adequate for the working condition. In fact, if the vibrator is not set in optimal conditions, it will not have the expected positive unjamming effect and outflow enhancement.

1. Jafari, A. and V. Saljooghi Nezhad, Employing DEM to study the impact of different parameters on the screening efficiency and mesh wear. *Powder Technology*, 2016. 297: p. 126–143.
2. Kloss, C. and C. Goniva, LIGGGHTS–Open Source Discrete Element Simulations of Granular Materials Based on LAMMPS. *Supplemental Proceedings: Materials Fabrication, Properties, Characterization, and Modeling*, 2011. 2: p. 781-788.
3. González-Montellano, C., et al., Validation and experimental calibration of 3D discrete element models for the simulation of the discharge flow in silos. *Chemical Engineering Science*, 2011. 66(21): p. 5116-5126.



Mechanics, Vol 1, Issue 1, 1401

Journal of Science and Technology in Mechanical Engineering

DOI: [10.22034/stme.2022.162701](https://doi.org/10.22034/stme.2022.162701)



Modeling and investigating the behavior of triangular origami DNA under the influence of laboratory temperature

Sadegh Dastorani^{1§}, Reza Hasanzadeh Ghasemi²

1. PhD candidate, Department of Mechanical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Iran.

2. Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, Hakim Sabzevari University, Iran.

Abstract

In this article, the mechanical behavior of triangular origami DNA, which has special appearance and functional characteristics, has been investigated. Triangular origami DNA can be introduced as a Nano-device with several degrees of freedom. To investigate this issue, molecular dynamics modeling and simulation have been done and then its performance is analyzed. The first step in knowing a Nano-device is its structural analysis. In this report, the structural changes of the Nano-device due to the change in temperature have been investigated the results show that the amount of structural changes has reached its lowest level in approximately 800 picoseconds. After this period of time, it can be said that the triangular origami DNA has relatively reached structural stability. The mechanical behavior of origami DNA will be such that it is suitable for taking different volumes of cargo. In other words, it can be used to carry Nano drugs with various dimensions. In fact, the most interesting parameter in this Nano-device is the flexibility of its arms. This flexibility can be properly used to carry different types of cargo.

Keywords

Mechanical behavior, Molecular dynamics simulation, Origami DNA.

Molecular engineering products need robotic devices known as nanorobotics to perform their activities. A nanorobot is basically a machine that can be controlled at the nanometer or molecular scale, which is made up of components at the nanoscale. The ability to manipulate at the nanoscale is the main application of Nanorobots. Applications vary from medical to aerospace and military applications. The construction of complex molecular devices can be made possible by Nanorobots in the future. It is expected that Nanorobots will create a

§ : Corresponding author, s.dastorani1994@gmail.com

fundamental revolution in the medical industry in the future, from precise drug delivery to cell repair and the destruction of cancer cells.

The main goal in the field of molecular machines is to use different biological elements as machine components. In this context, protein and DNA can act as motors, mechanical connections, transmission elements or sensors. If all these different components are assembled together in the right fit and rotation, they can form nanodevices with several degrees of freedom that are capable of applying forces and manipulating objects in the Nano world. The advantage of using natural machine parts is their efficiency and reliability.

DNA itself is relatively flexible as a biopolymer, but in DNA origami, many DNA strands are arranged in a coherent mechanical structure that maintains a well-defined geometry. Therefore, DNA origami has created new Nano-objects with three-dimensional geometric complexity.

In recent years, origami DNA has been used to construct a variety of 2D and 3D structures for various applications, such as Nanopores for single-molecule sensing, and Nanodevices for drug delivery. Also, the construction of functional mechanical structures such as springs, and actuators can greatly expand the field of DNA nanomachines, many of which are still unknown. In general, the mechanical performance of DNA nanomachines requires two key capabilities: (1) the ability to design mechanical behavior and (2) the ability to integrate dynamics (i.e., motion). In engineering design, control of mechanical behavior can be achieved by using multi-material components with optimal mechanical stiffness. The stiffness of origami DNA components can be different on different scales.

Therefore, in this research, nanodevices were modeled with the help of origami DNA, and then molecular dynamics simulation was used for structural investigation. First, in this article, using the Nanoengineer software, the design of three rectangles, pentagons, and triangles made of double-stranded DNA has been discussed, and the designed triangle is subjected to molecular dynamics simulation. All the shapes designed by this software consist of a long main string (chain), which is called a scaffold, and the rest of the short strings are complementary to this scaffold. Various software packages have been provided to perform calculations in the field of DNA. There are softwares available for preparing and fixing DNA defects, in this study Paymol and SPDBV¹ softwares were used.

Gromacs software with an AMBER94 force field and TIP3P water has been used for molecular dynamics simulation. To perform the simulation, first, the triangular origami DNA is placed in a tetrahedral water box at a suitable distance from the wall. As a result, the box contains a triangular origami DNA and 63688 water molecules. During the molecular dynamics simulation, the LINCS algorithm is used to bind all bonds. A time step of one femtosecond is used. Electrostatic reactions have been evaluated using the PME method with a cutoff radius of 1.2 nm. Energy minimization is done with 5125 steps to remove misplaced calls. Finally, the simulation process is performed at laboratory temperature with 500,000 steps (1 ns). VMD² software was used to graphically examine the results obtained from molecular dynamics.

DNA changes around equilibrium conditions depend on the local structural flexibility of DNA. Some parts of triangular origami DNA have high flexibility and some parts have less flexibility. RMSF³ is used to accurately investigate the local flexibility of different parts of triangular origami DNA and extract the parts with more flexibility. This nanodevice is shown by

¹Swiss PDB Viewer

²Visual Molecular Dynamics

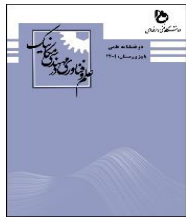
³Root Mean Square Fluctuation

specifying 4 branches obtained from molecular dynamics simulation in laboratory temperature conditions.

RMSD⁴, which is used to evaluate the deviation from the initial structure, is a measure of the convergence of the simulated system. For further investigation, once at 300 K temperature and once again with the same conditions at 305 K temperature, the simulation has been done, and the RMSD of the atoms shows that the simulation has reached equilibrium after about 800 ps.

In order to accurately investigate triangular origami DNA, according to the change in configuration obtained from molecular dynamics simulations, the opening surface of triangular origami DNA has been obtained as a function of temperature. This level is defined by connecting the atoms at the end of the amino acids of each arm. The surface of the opening of this nanodevice is a criterion of structural changes and also a criterion for examining the shape and size of portable cargoes, and an important parameter in examining the nanodevice is the distance of the arms relative to each other. In fact, the three arms of the nanodevice move relative to each other, and this movement changes the internal space of the nanodevice as a result, which can be used as a carrier for cargo.

⁴Root-Mean-Square Deviation



Failure analysis of six-cylinder passenger car engine camshaft

Karim Aliakbari^{1*}, Jafar Langari²

1. Department of Mechanical Engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran.
2. Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, University of Bojnord, Bojnord, Iran

Abstract

The camshafts are responsible for controlling the timing of the intake and exhaust valves at the right time in internal combustion engines. In this study, failure analysis was performed on two camshafts in a six-cylinder car made of gray cast iron. One camshaft failure occurred after about 177,000 kilometers and the other after about 208,000 kilometers between cam 1 and 2. In order to investigate the cause of cam failure, first, a series of tests including determination of chemical composition, microstructure, hardness measurement, and fractography were performed. The morphology of the fracture surface showed that the growth of the intergranular crack was from the zone of stress concentration and accompanied by ratchet marks. The hardness measurement results of the camshaft cross-section measured a maximum of 155 HB, while the average surface hardness values of the heat-treated surfaces are suggested to be at least 480 HB. The results of the investigation showed that the phenomenon of crack initiation and eventual failure of the cam can be caused by factors such as excessive load, low hardness, and the presence of impurities in the stress concentration zone of the camshaft.

Keywords

Automotive engineering, Camshaft fracture, Microstructure, Fractography, Failure cause.

Introduction

Most cast irons have a chemical composition of 2.5-4% carbon, 1-3% silicon, and the rest iron. Gray cast iron has lower tensile strength and impact resistance than steel, but its compressive strength is comparable to low and medium-carbon steel. The function of the camshafts in internal combustion engines is to open and close the intake and exhaust valves. Most camshafts are made of steel and have a surface hardness created by heat treatment, which is made by forging or casting methods [1]. In this study, failure analysis was investigated on six-cylinder passenger car camshafts made of gray cast iron. In the present work, in addition to focusing on the microstructure and mechanical properties, special attention has been paid to the stress analysis and the investigation of the cause of failure, which has been less mentioned in others research. In short, the order of the work done in the present work study is as follows: Selection of broken camshaft; Macrostructure analysis and dimension measurement; Analysis of the chemical composition of the camshaft material; Examination of mechanical properties

* : Corresponding author, karim-aliakbari@tvu.ac.ir

(hardness tests); Investigation of the microstructure using optical and scanning electron microscopes (OM and SEM); Numerical analysis of the stress field; Investigation of the failure cause.

Experiments

The chemical composition of the constituent elements of the camshaft was carried out according to ASTM E415-17 & ASTM E1086-14 standards by a spectrophotometer model SPECTROMAXx made in Germany. Microstructural images were taken using an optical microscope from different surfaces of the cross-section of the camshaft. After examining the microstructure of the material, the hardness test was performed based on the Brinell standard according to the ASTM standard: E384-17. In order to investigate the fractography of the cross-section of the camshafts after fracture, SEM images were prepared.

Results and Discussion

The subject of study in this research is the failure analysis on the camshafts of six-cylinder passenger cars. Fig. 1 shows the location of the fracture of the camshafts. One camshaft was broken after about 177,000 km and the other after about 208,000 km in service in the fillet zone between cams 1 and 2.

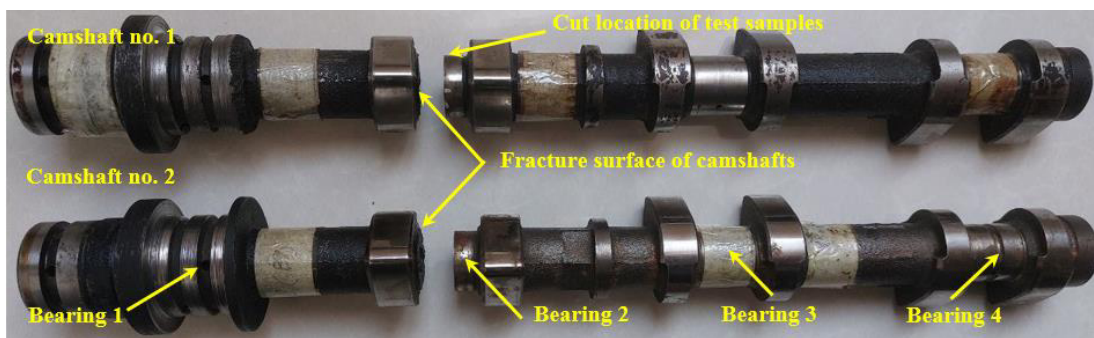


Fig. 1. The location of the camshafts fracture.

The results of the average values in terms of weight percentage of the chemical composition showed that the cast iron is of ferrite-pearlite gray cast iron type.

Fig. 2 shows the microstructure of the ferritic sample with partial pearlite before etching and after etching.

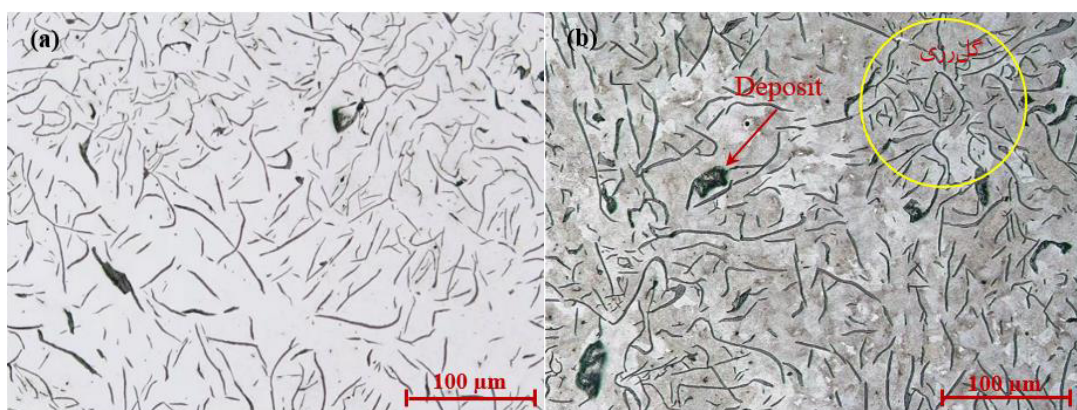


Fig. 2. The microstructure of the cross-sectional surface of the camshaft; (a) Before etching, and (b) After etching.

Fig. 3 shows the hardness measurement in the radial direction from the inner radius to the outer radius in two broken camshafts. As shown in Fig. 3, the maximum hardness value of the material of camshaft

no. 1 and no. 2 is equal to 155 and 154 HB, respectively, which is within the hardness range of standard material G150 [2] for the state without heat treatment. For camshafts according to Refs [1,3], the average hardness of the cross-section was reported as 240 HB (23 HRC), and if the average hardness of the surface layer under heat treatment is between 485 and 570 HB (50-56 HRC). So, it can be concluded that the measured hardness value of the camshafts in this work is lower than the standard hardness value used in the camshafts.

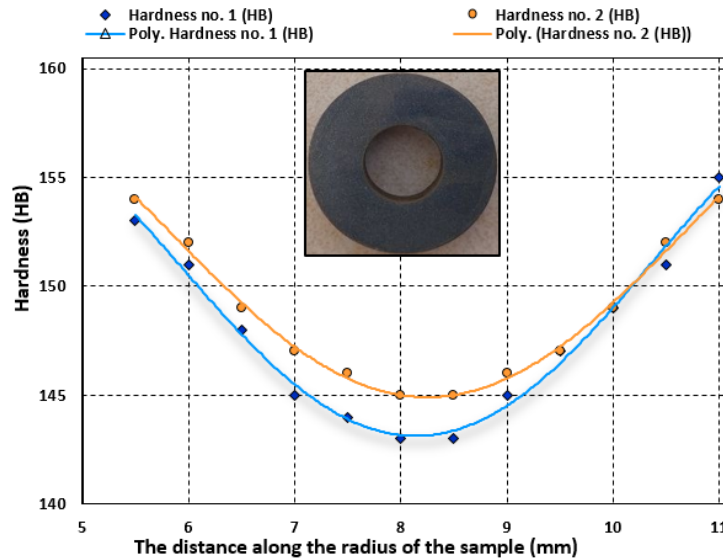


Fig. 3. Hardness measurement in the radial direction from the inner radius to the outer radius in two broken camshafts.

Fig. 4 shows the Macro and micro microstructure images of the fracture surface of camshafts no. 1. The morphology of the fracture surfaces in sample shows that the loading is of low cycle stress type and consists of two zones the crack initiation zone A, and the final fast fracture zone B with small ratchet marks. To investigate the origin of the crack in more detail, images of the fracture surfaces of camshaft no. 1 were prepared using the SEM, which are shown in Fig 4.b. It can be seen from the images that the fracture surface of gray cast iron shows the cleavage fracture characteristics of type A and B flake graphite structure and also a matrix with many holes on the fracture surface.

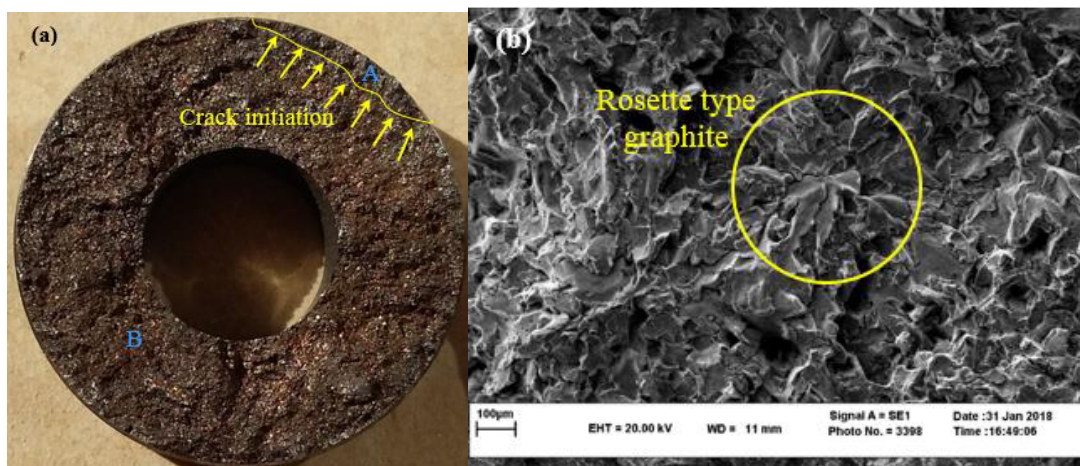


Fig. 4. Macro and micro structure images of fracture surface; (a) Macrostructure image, and (b) SEM image with magnification of X250.

To determine the points of stress concentration in the fracture zone with the finite element method (FEM), a camshaft stress analysis was performed. In the present study, meshing, element type selection, boundary conditions, loading method, and stress analysis were performed based on Refs [4,5]. Fig. 5 shows the von Mises stress distribution field resulting from the maximum applied force in the camshaft. The von Mises stress distribution at the stress concentration point of the camshaft fracture is equal to 30.34 MPa, which is about 23% of the yield stress of the camshaft material.

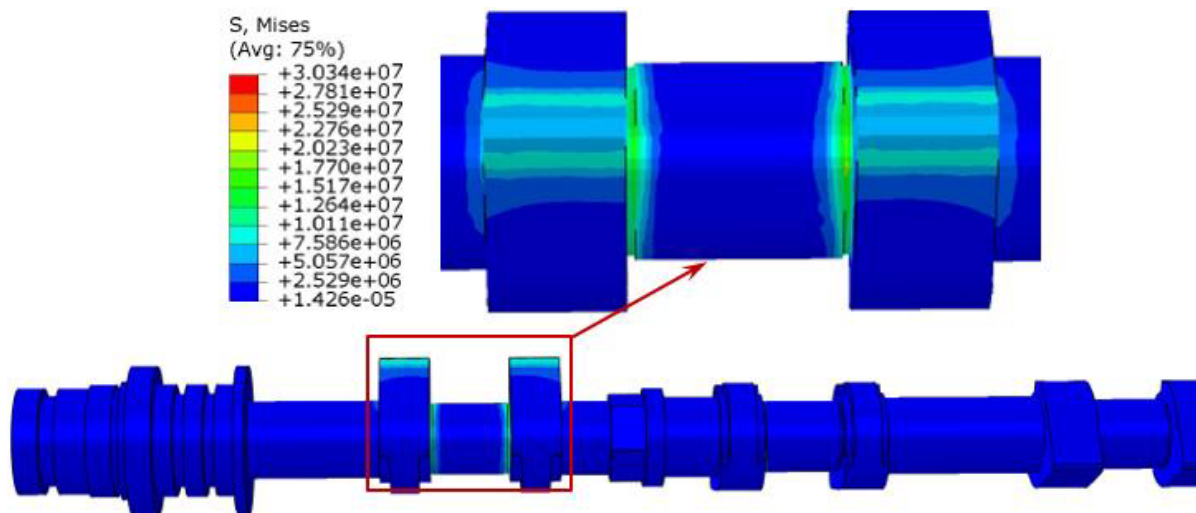


Fig. 5. The von Mises stress distribution in the camshaft.

Conclusion

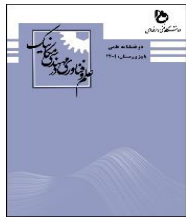
The study was carried out considering the failure of camshafts with 177000 and 208000 km in service of a six-cylinder gasoline passenger car, and the following results were obtained.

1. The results of the chemical composition confirm that the material used in the camshaft is G150 grade according to the standard. On the other hand, the results showed that the hardening of the camshaft was not properly subjected to deep heat treatment, or induction hardening was not used.
2. Examination with the OM showed that the microstructure of gray cast iron type A is of ferritic-pearlitic type. The presence of impurities in the matrix causes the discontinuity of the matrix and leads to the reduction of some mechanical properties of gray cast iron, and this in turn reduces the fatigue strength.
3. The morphology of the fracture surfaces in both samples showed that the loading is of low cycle stress type and consists of two-zone the crack initiation zone and the final rapid fracture zone with small ratchet marks.
4. Numerical stress analysis showed that the highest stress with about 23% of the yield stress is in the zone of the camshaft fillet where the failure occurred.
5. Fractography analysis showed that the fracture surface of gray cast iron has the cleavage fracture characteristics of type A and B with flake graphite structure and also a matrix. Also, the observation results showed that there is more rose-shaped graphite on the fracture surface of gray cast iron.
6. Given that the material chosen for the cast iron camshaft of the present work was selected according to the standard. But to ensure high fatigue life and prevent premature failure, it is recommended to use high-grade gray cast iron and nodular cast iron camshaft due to their high strength and also increase the hardness of the main camshaft surface.

7. Due to insufficient oil and overload on the engine, a series of scratches can be seen on the camshaft. Therefore, another way to prevent premature failure is to control the oil pressure and reduce the load on the engine, which can increase the fatigue life of the camshaft and prevent camshaft failure.

References

- [1] Yamagata H. 5 - The camshaft. In: Yamagata HBT-TS and T of M in AE, editor., Woodhead Publishing; 2005, p. 110–31. [https://doi.org/https://doi.org/10.1533/9781845690854.110](https://doi.org/10.1533/9781845690854.110).
- [2] Elliott R. Cast Iron Technology. Butterworth-Heinemann; 2014.
- [3] Bayrakceken H, Ucun I, Tasgetiren S. Fracture analysis of a camshaft made from nodular cast iron. Eng Fail Anal 2006;13:1240–5.
- [4] Hejma P, Svoboda M, Kampo J, Soukup J. Analytic analysis of a cam mechanism. Procedia Eng 2017;177:3–10.
- [5] Torshizian MR, Aliakbari K, Ghonchehi M. Failure Analysis of Ductile Iron Differential Housing Spline in 4WD Passenger Car. Int J Met 2021;15:587–601. <https://doi.org/10.1007/s40962-020-00487-2>.



Investigating the effect of process parameters on gas forming of AA6063 aluminum tube at hot temperature using response surface method

M. Rajaei^{1*}, S. J. Hosseini², H. Jamshidi Aval²

1. Department of Mechanics, Faculty of Neyshabour, Khorasan Razavi Branch, Technical and Vocational University, Neyshabour, Iran

2. Research Center for Advanced Processes of Materials Forming, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

Abstract

Aluminum alloys have many applications, anti-corrosion properties, and good strength-to-weight ratio. The hot metal gas forming process is one of the new methods. In this article, a statistical method based on finite element simulation has been used in order to obtain the highest percentage of mold filling and the lowest percentage of thinning in the forming area of 6063 aluminum alloy cylindrical stepped tubes. First, the detailed model of the finite elements of the process is prepared and the accuracy of the created model is confirmed by comparison with the results of the experimental part. Then the regression analysis of the response procedure has been used to fit a level on the responses obtained from the experiments. Effective factors including forming temperature, pressure, pressure rate, axial feed and punching speed were evaluated from the response surface method in order to extract the model and find the greatest effect. Each of these factors has been studied at three levels in the form of central composite design experiments to identify the effect of parameters and the best conditions. Design Expert software was used for modeling the response surface method and Abaqus finite element software was used for simulation. According to the obtained results, the optimal point obtained for both studied characteristics is: Temperature 552 °C, pressure 6.5 bar, pressure rate 0.02 bar/s, axial feed 7 mm and feed speed 0.05 mm/s with filling percentage 91.2 and thinning percentage 10.37 were obtained. The presented model for predicting the values of the dependent variables had very close results with the experimental findings.

Keywords

Optimization, Hot Metal Gas Forming, Response Surface Methodology, AA6063 Alloy Step Tube

* : Corresponding author, mrjaie@tvu.ac.ir

Introduction

With the ever-increasing progress of military, aerospace and automotive technology in order to reduce fuel consumption, reduce production costs, produce higher quality products, and also produce complex parts, the use of lightweight materials such as aluminum alloys has been seriously considered. In this regard, one of the new solutions is the use of gas blowing at a very high temperature, which is called the process of hot metal gas forming. The extremely low silane stress of the material at high temperature enables the forming of large parts, and the high ductility of the material at high temperature, which enables the production of complex and deep parts, is one of the beneficial features of this process.

Statement of the problem, innovation and mention of goals

In this article, the optimal determination of the parameters of forming temperature, pressure, pressure rate, axial feeding and punching speed on the ductility of stepped pipes in the process of hot metal gas forming in order to create a suitable filling of the mold and to minimize the maximum thinning of the pipe, which is done using the response surface method. It has been used in order to extract the model and find the most effective factors. Each of these factors has been studied at three levels in the form of central composite design experiments to identify the effect of the parameters and the best conditions for the maximum filling of the mold and to minimize the maximum thinning of the tube.

Research method

The equipment used in the hot forming process of the tube with gas blower along with axial feeding are: 6063 aluminum alloy tube with a diameter of 25 mm and a thickness of 1.3 mm, mold, air compressor, manometer, k-type thermocouple, heating system and axial feeding system set. In this research, with regard to forming at high temperature, a new design was used in the mechanism and mold to apply axial feeding, the material of the mold was SPK steel, which was machined with CNC machine with high precision. Due to the change of the symmetrical shape of the pipe, a three-dimensional axially symmetrical model was used to simulate the process with Abaqus software. The type of elements is C3D8R and the number of elements is 3 in line with the thickness of the pipe and the dimensions of the elements are $0.43 \times 1 \times 1 \text{ mm}^3$. The mold was also meshed with R3D4 linear and square elements, from the series of rigid elements, and the implicit solver was used for simulation analysis. The most important issue of this research is the investigation of the main and mutual effects of the factors, which is why the statistical design of the response level was chosen.

Experiment design

In this research, modeling was done to perform the experiments introduced by the response surface method, using finite element simulation software (Abaqus), and then RSM-FEA method was used to obtain the required information according to the DOE design. In this study, the effect of independent variables including: forming temperature (T), pressure (P), pressure rate ($\dot{P}$), axial feed (X) and mandrel speed (V) was evaluated at three levels.

The initial design of the experiments was designed and used with the help of Design & Expert software and 43 experiments were used by the software for optimization. Among the different models, the software has suggested the quadratic equation as the most suitable model for fitting the data. After selecting the quadratic equation as the appropriate model, ANOVA analysis of variance was performed. p-value is used to ensure the correctness of the statements in the model. The smaller the p-value (significant level), the better the proposed model fits the response values. If two expressions have the same level of significance, an expression with a higher F-value (test statistic) is more important.

Statistical analysis

Expressions whose P value is less than 0.05 can statistically predict the data with an error of less than 5%. The results of ANOVA variance analysis for mold filling percentage show that the effect of nutrition (X) is the most important, followed by pressure (P) and temperature (T).

The results of ANOVA variance analysis for the pipe thinning percentage show that the effect of temperature parameters, pressure rate and gas pressure value have a greater effect on the response of the thinning percentage. According to the F-value in the presented variance analysis, temperature is the most important and influential parameter for the thinning percentage.

Results and discussion

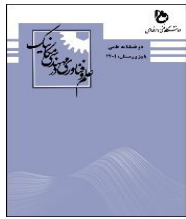
The mutual influence of parameters on the mold filling percentage was investigated. The interaction effect of pressure and temperature with axial feeding on the mold filling percentage showed that with increasing temperature, pressure and axial feeding, the filling percentage increases. It can also be seen that with increasing pressure, the effect of axial feeding on the filling percentage increases. Therefore, by increasing the pressure, the shrinkage disappears and the filling percentage increases. It can also be seen that in low axial feeding, the filling percentage increased with increasing temperature from 530 to 550 degrees Celsius. But from the temperature of 550° to 580°C, the filling percentage does not change significantly. This process continues with the increase of the central nutrition. On the one hand, with the increase in temperature, the strength of the material decreases and the deformation of the pipe increases. On the other hand, with the increase in temperature, the possibility of the tube sticking to the mold wall increases and the flow of material into the mold cavity becomes more difficult.

Optimization

After finding regression models to obtain the maximum mold filling and the minimum thinning percentage in the optimization section of Design Expert software, in order to determine the optimal point, the amount of forming temperature, pressure, pressure rate, axial feed and mandrel speed as objective functions, and percentage The filling of the mold and the percentage of tube thinning were introduced to the software as the desired goals of the experiments in the statistical analysis. The optimization of the dependent variables was done using the response level method and the optimal points were determined. Optimum values were obtained at a temperature of 552 degrees Celsius, a pressure of 6.5 bar, a pressure rate of 0.02 bar/s, axial feed of 7 mm from each side, and a mandrel speed of 0.05 mm/s with a filling percentage of 91.2 and a thinning percentage of 10.37, The experimental test was carried out under optimal loading conditions.

Conclusion

A combination of the response surface method and the finite element method in order to determine the conditions for the plasticity method of the cylindrical stair tubes with the aim of achieving the maximum filling and minimizing the thinning in the sections. The obtained results indicated that the percentage of filling of the mold and the percentage of thinning of the produced piece were 92.3 and 9.45, respectively, which is in good agreement with the results of the value predicted by the model. The thickness distribution diagram of the formed sample was compared in simulation and experiment. The difference between experimental and numerical filling percentage is less than 5%.



The effect of hot fluid and Nanotube-Water Flow Rate on the Efficiency of Nanofluid on Gasket-plate heat exchanger

Omid Ramezani Azghandi^{1*}, Mohammad Ali noparast²

1. PhD, Department of Mechanical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

2. Sana Mobadel Tose pars company, Mashhad, Iran.

Abstract

In this paper, the Carbon nanotube was stabilized in a water-based fluid by sodium dodecyl sulfate as a surfactant. Then, hot fluid (water) was in contact with the nanofluids (carbon nanotube -weight percentage of 0. 01) on both sides of the heat exchanger plate that has 13 plates. In order to investigate the functional groups and morphology of nanoparticles, obtained by FTIR, EDX, Raman analysis, Transmission, and Scanning electron microscopes images were used. The effect of the flow rate of hot fluid and nanofluid on the heat transfer coefficient and pressure drop was analyzed experimentally. The results in the range of laminar flow showed that the heat transfer coefficient increased by the flow rate of hot fluid and nanofluid rising (53.47% and 43.4%, respectively) and decreases the pressure drop of nanofluid, which are both positive effects. Determining the effect of nanofluid on the efficiency of the heat exchanger compared to the state without nanofluid (water-water), it was found that the increase in the flow rate of hot fluid and cold fluid causes an increase of 22.9% and 17.3%, respectively. It indicates the benefit of using carbon nanotubes in high stated flow rates.

Keywords

Carbon nanotube, Surfactant, Heat Transfer Coefficient, Heat Exchanger, laboratory set

Introduction

Using different nanoparticles [1-2] and adding them to different base fluids such as water, ethanol, oil, ethylene glycol, etc. [3] in order to improve their properties, which are introduced as nanofluid [4], is a desirable method in different heat transfer applications. In this article, with the help of a sodium dodecyl sulfate surface as a surfactant (non-functional method), a nanofluid containing multi-walled carbon nanotubes in 0.01 weight percent was prepared. The prepared nanofluid was used in a laboratory setup equipped with a gasket plate heat exchanger. And it was tried to check the effect of changing a fluid that is on one side of the exchanger (for example, it flows on the even plates) on the results of the other side of the exchanger (odd

* : Corresponding author, omid_r64@yahoo.com

plates). Based on this, the effect of hot fluid flow rate (water fluid) on the overall heat transfer coefficient and pressure drop of nanofluid was investigated. The tests were carried out for a weight percentage of 0.01. Also, in order to determine that the described method and use of nanofluid improve the heat transfer and performance of the exchanger, the efficiency of the exchanger has been checked for two states of nanofluid and without the use of nanofluid (water-water).

Experiments

To prepare nanofluid containing multi-walled carbon nanotubes, from sodium dodecyl sulfate surface activator (50 gr, product of Azmiran company in Iran), multi-walled carbon nanotubes (diameter 20-30 nm and length 10-5 μm) and product of VCN company, gr5, deionized water (150 liters, neutral pH, from inside Iran) was used.

For the morphology of the obtained powder, an energy dispersive spectroscopy (EDS), Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR), Raman spectrometer, and transmission electron microscope (TEM) image were performed.

1. Energy Diffraction Spectrometer (EDS): An EDS was used for structural analysis and chemical properties of the sample. The design principles are based on X-ray radiation to the sample at different angles and analysis of its diffraction or reflection pattern.
2. Fourier infrared spectrometer: FTIR is a method for identifying molecules and especially functional groups in compounds. A device that obtains the absorption spectrum of a compound is called an infrared spectrometer or, more precisely, a spectrophotometer. Each substance has its own infrared spectrum, and like a fingerprint, it is specific to the molecule itself.
3. Raman spectrometer: One of the main applications of Raman spectrometers in the discussion of carbon nanostructures is to determine the ratio of disordered groups to tangential groups. The hybridization of carbon in carbon nanotubes (with high purity) is sp^2 , and the addition of functional groups to their main structure changes the hybridization of carbon and turns it into sp^3 .
4. Transmission electron microscope (TEM): TEM was used to examine the morphology.

Fig. 1 shows the device and substrate made to check the overall coefficient of heat transfer and pressure drop of nanofluid (carbon nanotube-water) in a laminar flow regime. The bed consists of two hot and cold loops, each of which has a fluid storage tank, a pump, a pressure and temperature measuring section (before and after the plate heat exchanger), and a section related to measuring the fluid flow rate. In all the tests, the heat exchanger has 13 plates, which by changing the hot fluid inlet flow rate, tests are performed at a certain cold fluid flow rate, and then the cold fluid flow rate is changed with the help of valves embedded in the setup and the tests are repeated.



Fig. 1. The test setup used for the tests

Using the prepared test setup and the equations and specifications provided by Ramezani [5], with the help of the temperature and pressure notes for the cold and hot fluid at the inlet and outlet of the exchanger and the flow rates recorded at the inlet of each fluid, the thermophysical properties of each fluid (such as density, Specific heat capacity, coefficient of thermal conductivity and viscosity, mass velocity in the channel and in the inlet and outlet, Reynolds number, Prantel number, volume and weight fraction, Nusselt number, convection heat transfer coefficient, and overall heat transfer coefficient, friction coefficient, the pressure drop for the channel and port and the total pressure drop are calculated in the same way.

Also, with the help of Eq. 1, the pump power can be obtained for two states of nanofluid water and water-water (without using nanofluid) [6].

$$\left(\frac{W_{nf}}{W_b}\right) = \left(\frac{\mu_{nf}}{\mu_b}\right) \left(\frac{\rho_b}{\rho_{nf}}\right)^2 \quad (1)$$

With the help of Eq. 2, the efficiency or performance of the heat exchanger can be calculated. In order to be economically acceptable, the ratio of the convection heat transfer coefficient to the ratio of pumping power in the two modes of using hybrid and without nanofluid should be greater than one [7].

$$\eta = \frac{(h_{nf}/h_b)}{(W_{nf}/W_b)} \quad (2)$$

In the above equations, ρ , μ , h , and W are fluid density, viscosity, conversion heat transfer coefficient, and pump power, respectively. Also, the subscript nf is the nanofluid and b is the base fluid.

Results and discussion

In Fig. 2, the results obtained from the curves of the overall heat transfer coefficient in terms of volume flow rate for water-water fluid are drawn. The volume flow rate of hot fluid is considered to be 3 lpm. By comparing the results obtained from the graph of the overall heat transfer coefficient in terms of volume fluid flow rate with the results of Tiwari et al. [8], it was determined that the small difference is related to the Chevron angle and perhaps the small difference in the properties of the water base fluid (such as pH). Also, the vertical error range of the graphs is 4%.

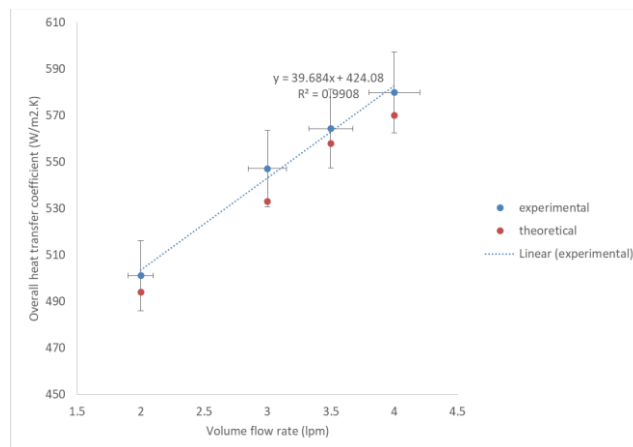


Fig. 2. Comparison of the results obtained for the exchanger with a Chevron angle of 45 degrees with the theoretical relations for the water base fluid.

To determine the effect of hot fluid flow rate on the overall heat transfer coefficient and pressure drop, a heat exchanger and nanofluid-water were used. In Fig. 3, the effect of hot fluid flow rate on the overall heat transfer coefficient of nanofluid (cold fluid) at different flow rates has been investigated.

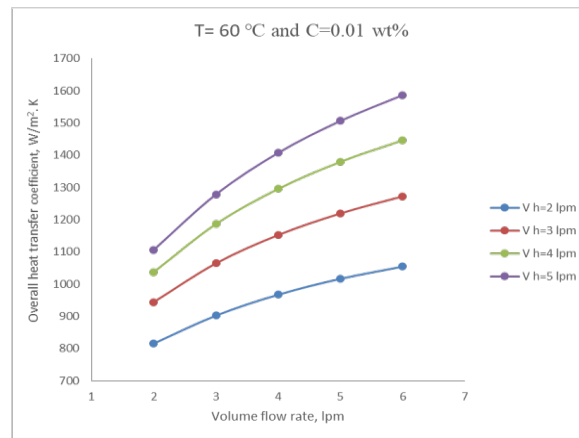


Fig. 3. The effect of different flow rates of hot fluid on the overall heat transfer coefficient of nanofluid

For this purpose, the temperature of the element was set to 60 °C. Nanofluid with a weight percentage of 0.01 and a flow rate of 2-6 lpm was placed in contact with a hot fluid with a flow rate of 2-5 lpm. As it is clear in Fig. 3, increasing the flow rate of hot fluid (at a constant flow rate of cold fluid) and cold fluid (specific flow rate of hot fluid) improves the overall heat transfer coefficient of nanofluid. In heat exchangers, in addition to the heat transfer coefficient, the pressure drop in the exchanger is also very important. Therefore, Fig. 4 was analyzed in order to determine the effect of increasing the flow rate of hot fluid and cold fluid on the pressure drop of nanofluid.

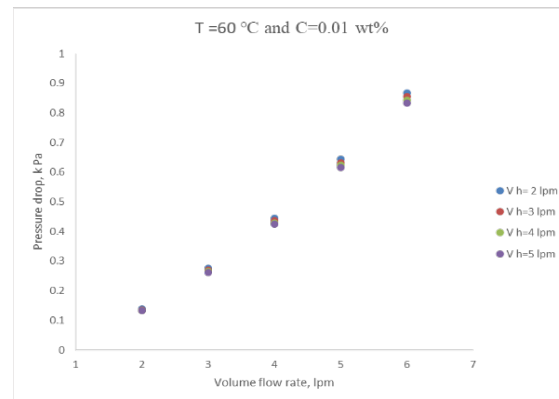


Fig. 4. Effect of hot and cold fluid flow rate on nanofluid pressure drop

As it is known, increasing the nanofluid flow rate increases the pressure drop, which is not desirable (for 2 lpm of hot fluid, increasing the flow rate of nanofluid increases the pressure drop by 33.530% in the exchanger), but increasing the hot fluid flow rate decreases the pressure drop in the exchanger (In a specific nanofluid flow rate of 6 lpm, increasing the hot fluid flow rate from 2 to 5 lpm improves 396.5%), which is very desirable and will be effective in choosing the pump size.

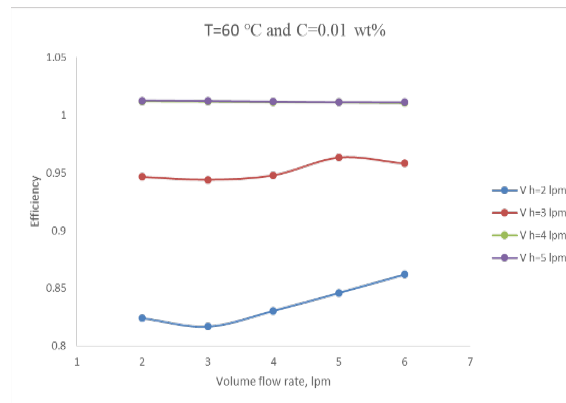


Fig. 5. Effect of hot fluid flow rate on exchanger efficiency

From Fig. 5, it was found that increasing the flow rate of hot fluid at a certain flow rate of nanofluid improves the efficiency of the exchanger, or in other words, the use of nanofluid-water will improve the efficiency of the exchanger compared to when only water-water is used (both sides are water exchanger plates).

Conclusion

In the present work, a multi-walled carbon nanotube was stabilized in water base fluid at a weight percentage of 0.01 wt.% with the help of a sodium dodecyl sulfate surface activator. In order to investigate the effect of hot fluid flow rate (water) at a constant temperature of 60 °C on the heat transfer coefficient and pressure drop of nanofluid, a gasket plate heat exchanger was used in which nanofluid (on odd plates) and water (on even plates) are flowing. The hot fluid flow varies from 2 to 5 lpm. The results showed that increasing the flow rate of hot fluid increases the overall heat transfer coefficient by 50.47% and also decreases the pressure drop on the side of the nanofluid, which both results are favorable (positive point) in heat exchangers. Also, in order to determine the effect of nanofluid compared to the time when nanofluid was not used (water-water), the performance of nanofluid on a gasket plate heat exchanger with 13-plate was investigated. Therefore, it was found that the increase in hot fluid flow rate leads to an improvement of 22.9%, which indicates that the preparation of nanofluid with the help of sodium dodecyl sulfate surface activator and the method (containing carbon nanotubes in water base fluid) described in the discussions that aim to improve the rate of heat transfer will be desirable. Also, the increase in the flow rate of nanofluid was also investigated, which indicates the improvement in performance.

References

1. Giwa, S. O., Sharifpur, M., Goodarzi, M., Alsulami, H., & Meyer, J. P. (2021). Influence of base fluid, temperature, and viscosity on the thermophysical properties of hybrid nanofluids of alumina-ferrofluid: experimental data, modeling through enhanced ANN, ANFIS, and curve fitting. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 143(6), 4149-4167.
2. Das, P. K. (2017). A review based on the effect and mechanism of thermal conductivity of normal nanofluids and hybrid nanofluids. *Journal of Molecular Liquids*, 240, 420-446.
3. Ali, N., Teixeira, J. A., & Addali, A. (2018). A review on nanofluids: fabrication, stability, and thermophysical properties. *Journal of Nanomaterials*, 2018.
4. Naddaf, A., & Heris, S. Z. (2018). Experimental study on thermal conductivity and electrical conductivity of diesel oil-based nanofluids of graphene nanoplatelets and carbon nanotubes. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 95, 116-122.

5. Ramezani Azghandi, O., Maghrebi, M. J., & Teymourtash, A. R. (2021). The Effect of Plate Numbers on Optimal Condition of Gasket Heat Exchanger by Graphene-Carbon Nanotube Hybrid. *Journal of Solid and Fluid Mechanics*, 5(11), 149-163 (in Persian).
6. Shanbedi, M., Amiri, A., Zeinali Heris, S., Eshghi, H., & Yarmand, H. (2018). Effect of magnetic field on thermo-physical and hydrodynamic properties of different metals-decorated multi-walled carbon nanotubes-based water coolants in a closed conduit. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 131(2), 1089-1106.
7. Amiri, A., Sadri, R., Shanbedi, M., Ahmadi, G., Kazi, S. N., Chew, B. T., & Zubir, M. N. M. (2015). Synthesis of ethylene glycol-treated graphene nanoplatelets with one-pot, microwave-assisted functionalization for use as a high performance engine coolant. *Energy conversion and management*, 101, 767-777.
8. Tiwari, A. K., Ghosh, P., & Sarkar, J. (2013). Performance comparison of the plate heat exchanger using different nanofluids. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 49, 141-151.



Mechanics, Vol 1, Issue 1, 1401

Journal of Science and Technology in Mechanical Engineering

DOI: [10.22034/stme.2023.168720](https://doi.org/10.22034/stme.2023.168720)



Numerical study of the effect of magnetic field on velocity and pressure drop of magneto hydrodynamic fluid in blanket

Mobin Ghafari Shad ¹, Mostafa Valizadeh Ardalan ², Ali Javadi ^{3*}

1. Department of Mechanical Engineering, University of Bergamo, Bergamo, Italy.

2. Department of Mechanical Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran.

3. Department of Mechanical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

Abstract

The present study investigates the structure of a nuclear fusion reactor and the importance of magnetic hydrodynamic fluid. In reactors, the fluid is separated from the main body of the blanket by a separating layer. The separating structure is important in two ways. This structure primarily acts as a thermal insulator. The second priority is used for the separator to adjust the pressure and reduce it. The topics selected in this study are: the effect of magnetic field strength, profiles and dimensions of a blanket, wall thickness, flow velocity and pressure drop, as well as the profile of flow velocity changes due to magnetic field strength. The results show that the maximum velocity in blanket with rectangular cross section in 1T field is 11% and in 4T field is 9% faster than blanket with square cross section. Also, increasing the magnitude of the magnetic field from 1T to 4T causes a 9-fold increase in pressure drop in the blanket with a square cross-section and an 11-fold increase in the pressure drop in the blanket with a rectangular cross-section.

Keywords

Magneto hydrodynamics, Blanket, Pressure drop, Magnetic field, Numerical study, Nuclear fusion.

Introduction

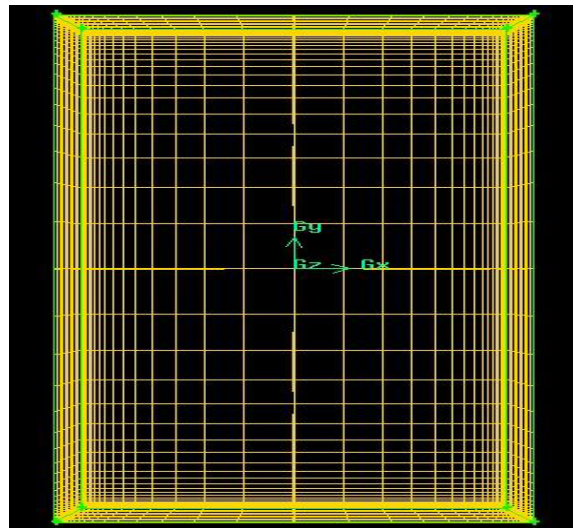
Due to the lack of fossil fuel resources, air pollution and a significant increase in energy consumption, scientists have been looking for a clean and safe energy source such as nuclear fusion since 1970. The ITER nuclear fusion reactor is the largest international project in which very important issues such as the magneto hydrodynamic fluid pressure drop, flow rate and the

* : Corresponding author, alijavadi91@yahoo.com

amount of heat transfer from the blanket body have been investigated. Despite the extensive efforts of researchers, the ITER project has not yet been put into operation. In this research, the effect of the magnetic field on the velocity profile and pressure drop and the effect of the channel cross-section dimensions on the magnetic hydrodynamics behavior have been investigated with the aim of improving the nuclear fusion process, achieving a reliable velocity profile and choosing the best blanket channel cross-section.

Materials and Methods

In this research, two blankets with a square cross-sectional area of 25×25 mm and a rectangular cross-sectional area of 25×50 mm were designed with the aim of comparing the velocity and pressure drop of magnetic hydrodynamic fluid. Pb-Li 17 has been used as fluid. Assuming that the external walls of the channel are insulated, two magnetic fields of 1 Tesla and 4 Tesla have been applied to the blanket in the Z direction. By using the Ansys Fluent 20 software, the independence of the blanket network is checked and a network consisting of 1,200,000 nodes is selected to solve the problem. Considering the no-slip condition in the walls and choosing the speed of 0.01 m/s and the pressure of 0 atmosphere as the boundary conditions, the velocity profile and the fluid pressure drop have been investigated. Finally, for validation, the results obtained in this study have been compared with the results of one of the previous valid studies.

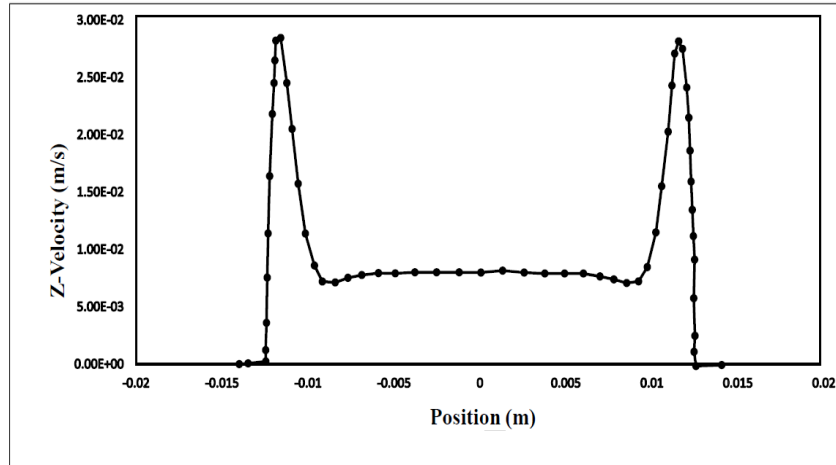


Channel mesh with square cross section.

Results

According to the obtained results, the rectangular profile is not suitable for the blanket because it increases the pressure drop. Since the Lorentz force acts against the direction of the fluid, with the increase in the intensity of the magnetic field, the amount of pressure drop also increases. By increasing the magnetic field from 1 Tesla to 4 Tesla, the pressure drop increases 9 times in the square cross-section and 12 times in the rectangular cross-section. Although the magneto hydrodynamic fluid pressure drop is always mentioned as an undesired factor, but in this research, with a new approach, the pressure drop in the blanket has been used to control the stability of nuclear fusion. Also, by increasing the magnetic field from 1 Tesla to 4 Tesla, the maximum velocity near the side walls increases twice. Needless to say that, by changing the cross section of the channel from square to rectangle, due to the reduction of Lorentz force,

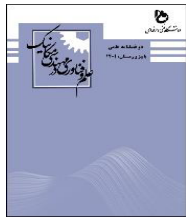
the maximum velocity increases by 11%. By looking at the Velocity profile in the both rectangular and square cross-section, this fact can be observed that due to the Lorentz force, the magneto hydrodynamic fluid velocity will be in the highest possible form near the side walls and decreases drastically in the center of the channel.



Full velocity profile in channel with square cross section at 1T.

Reference

1. S. Smolentsev, N. Morley, M. Abdou, R. Munipalli, R. Moreau, Current approaches to modeling MHD flows in the dual coolant lead lithium blanket, *Magneto hydrodynamics*, 42(2-3) (2006) 225-236.
2. C.N. Kim, A.H. Hadid, M.A. Abdou, Development of a computational method for the full solution of MHD flow in fusion blankets, *Fusion Engineering and Design*, 8 (1989) 265-270.
3. X. Wang, E. Mogahed, I. Sviatoslavsky, MHD, heat transfer and stress analysis for the ITER self-cooled blanket design, *Fusion Engineering and Design*, 24(4) (1994) 389-401.
K. Starke, L. Buhler, S. Horanyi, Experimental MHD-flow analyses in a mock-up of a test blanket module for ITER, *Fusion Engin.*



Mechanics, Vol 1, Issue 1, 1401

Journal of Science and Technology in Mechanical Engineering

DOI: [10.22034/stme.2023.168734](https://doi.org/10.22034/stme.2023.168734)



Numerical and Experimental study of a new building cooling system based on compression refrigeration cycle

Saeed Vahidifar¹, Seyed Hasan Nabavi², Mahdi Zakeri³, Mohammad Mahdi Naserian^{4*},
Amin Heydarian⁵

1. Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Montazeri, Khorasan Razavi Branch, Technical and Vocational University (TVU), Mashhad, Iran.

2. Assistant Professor, Department of Electrical Engineering, Faculty of Montazeri, Khorasan Razavi Branch, Technical and Vocational University (TVU), Mashhad, Iran.

3,5. B.Sc, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Montazeri, Khorasan Razavi Branch, Technical and Vocational University (TVU), Mashhad, Iran.

4. PhD, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Montazeri, Khorasan Razavi Branch, Technical and Vocational University (TVU), Mashhad, Iran.

Abstract

Today, various cooling systems such as evaporative cooler, split, air conditioner etc., are used to cool the building, which have a number of advantages and disadvantages. One of the most important disadvantages that can be mentioned for many cooling systems is the non-uniform temperature distribution in the building zones. The most important part of the building's heat loss is through the windows. Accordingly, in this research, a new cooling system based on compression refrigeration cycle is proposed and examined numerically and experimentally. Experimental evaluation of this system was performed in the air conditioning workshop and its numerical evaluation was performed in Design Builder software. In addition this system was compared with split cooling system. Among the most important results obtained from this research, we can point out the uniform distribution of the indoor air temperature and the reduction of energy consumption compared to the convectional cooling systems. When using a window coil system, the difference between the maximum and minimum temperature in a large part of the room was less than 1 degree Celsius. In the split system, however, the temperature has changed by about 2 degrees Celsius by moving from the ceiling of the room to the floor. Moreover, energy consumption of the system was 6.7% lower than that of split cooling system.

Keywords

Building cooling system, Window coil system, Split system, Experimental evaluation, Numerical evaluation, Uniform temperature distribution.

* : Corresponding author, m.m.naserian@pgs.usb.ac.ir

Introduction

In this article, a new cooling system based on compression refrigeration cycle is proposed and examined numerically and experimentally. The novel system uses a transparent cooling coil with water as the working fluid, inside the windows. The reason for using the coil in the window is to make the room temperature distribution uniform. In addition, the water in the coil reduces the energy consumption needed for cooling by reflecting and absorbing part of the infrared spectrum of sunlight. For this purpose, we will first design and then investigate, and analyze the heat transfer of two rooms with the same boundary conditions and dimensions with different cooling systems, one of them equipped with the current system and the other one with the split system.

Problem analysis

These two systems have been analyzed separately as follows:

- 1- Conducting tests and comparisons experimentally with actual boundary and dimensional conditions based on existing standards.
- 2- Simulation and comparison using the DesignBuilder software with specifications and practical test data.

The new cooling system is based on the cooling coil and is installed on the window. In this transparent glass coil, water with a lower temperature enters the coil from the lower part and after heat exchange, it leaves with a higher temperature from the upper part of the coil. The schematic of the coil is shown in the figure below.

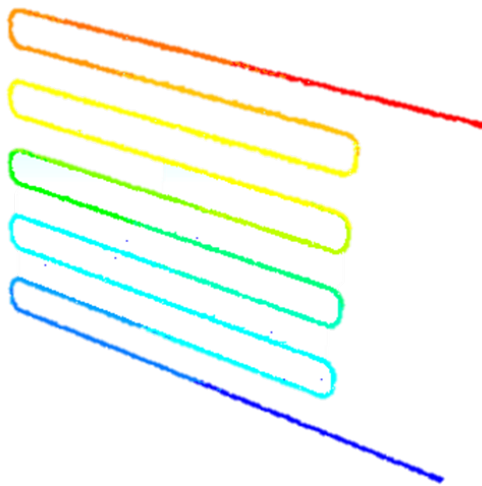


Figure 1: Schematic of the glass coil used in this research

Experimental study

In order to experimentally study the designed system, the prototype of this system was built and installed in the air conditioning workshop of Montazeri Technical College of Mashhad. This system consists of a glass coil placed inside the window of the room (Figure (2)) and also a condensation refrigeration cycle (Figure (3)) installed outside the room. The working fluids of the compression refrigeration cycle and the window coil are R314 and water, separately. The use of water is due to its transparency (daylight passes through the window without disturbance), high specific heat capacity and non-toxicity (in case of leakage). Heat exchange

between the water cycle and the refrigeration cycle was conducted through a coil heat exchanger with a copper coil.

In order to compare the two systems in terms of energy consumption, they were modelled in Design Builder software. The simulation results of these two systems in Design Builder software show that the energy consumption of the split system is 209 kWh and the energy consumption of the window coil system is 195 kWh. According to the results, the energy consumption of the window system is about 6.7% less than the split system.



Figure 2: Window with glass coil used in this research



Figure 3: A view of the room and the cooling system

Results and discussion

As can be seen in figures (4) and (5), the use of this system, compared to the split system, has resulted in more uniformity of temperature in the room, so that the difference between the maximum and minimum in a large part of the room is less than 1 degree Celsius which is in consistent with the experimental measured temperatures at eight different heights from the room floor. However, in the split system, by moving from the ceiling of the room to the floor,

the temperature changes by about 2 degrees Celsius. The non-uniform distribution of the room temperature in the case of using the split is caused by the heat entering through the window due to the large difference in the temperature of the inside and outside air (approximately 20 degrees Celsius). In addition, the air around the split evaporator exchanges heat with the refrigerant at a temperature of 5 degrees Celsius, while in the window system, water enters the coil at a temperature of 16 degrees Celsius. Therefore, the temperature difference of 20 degrees of the refrigerant in the evaporator with the set temperature of the room (25 degrees Celsius), compared to the temperature difference of 9 degrees of the water entering the coil and the set temperature of the room, has led to the creation of a cooler core around the split, which This itself leads to non-uniformity of room temperature.

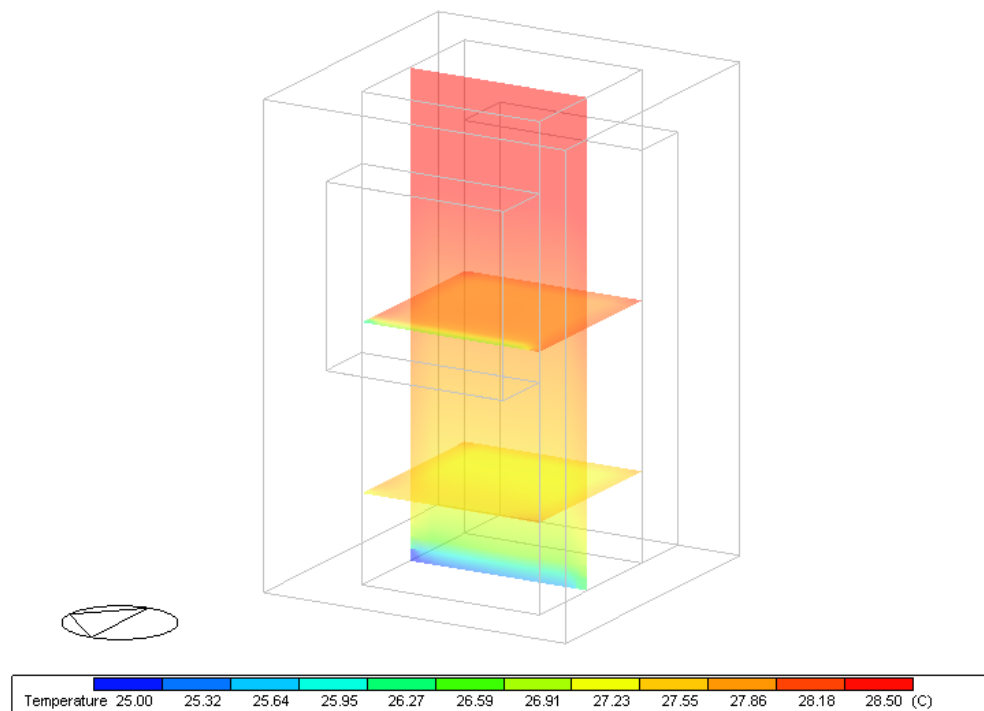


Figure 4: Room temperature contour in cooling with window coil in DesignBuilder software

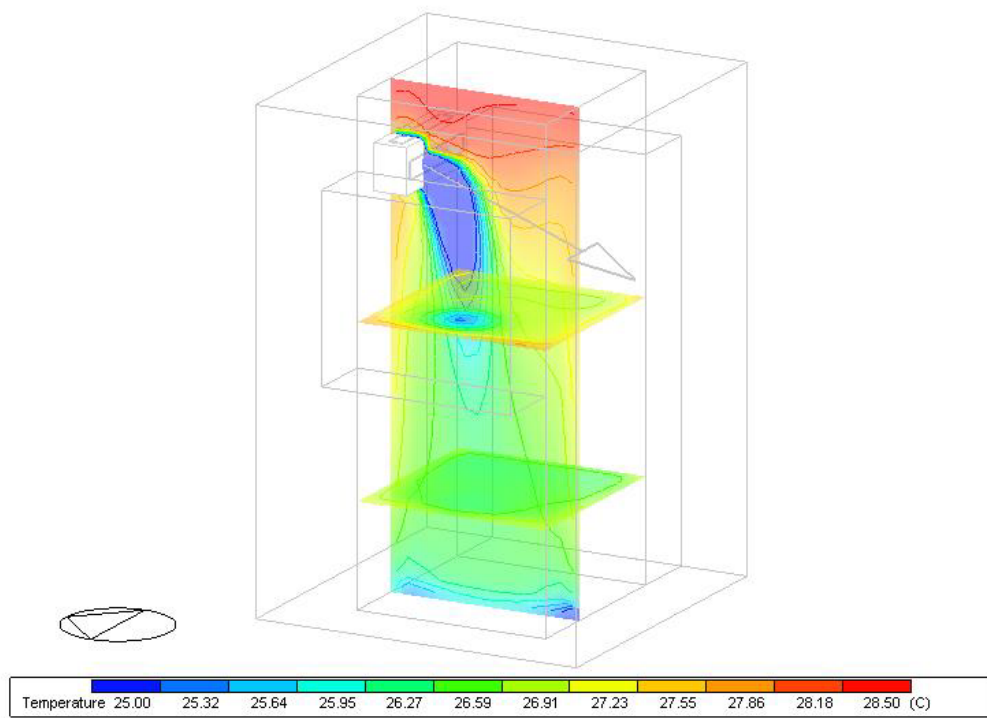
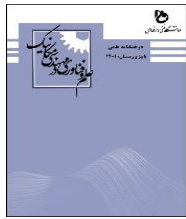


Figure 5: Room ambient temperature contour in split cooling in DesignBuilder software



Mechanics, Vol 1, Issue 1, 1401

Journal of Science and Technology in Mechanical Engineering

DOI: [10.22034/stme.2023.168733](https://doi.org/10.22034/stme.2023.168733)



Experimental Analysis of an Orthosis Effect on Human Balance during standing and walking

seyed amir hoseini sabzevari^{1*}, maryam zare²

1. Assistant Professor, Faculty of Engineering & Technology, University of Gonabad, Gonabad, Iran

2. Bachelor's degree in mechanical engineering, Faculty of Engineering & Technology, University of Gonabad, Gonabad, Iran

Abstract

In recent decades, due to the significant increase in the elderly in the age pyramid of most of the country, wearable orthoses have received more attention with regard to rehabilitation. Sudden falls are one of the most important factors leading to death in the elderly. In this article, the impact of an orthosis on human balance while standing and walking has been investigated. The effect of this simple orthosis in reducing body metabolism while walking has been studied. In this article, the experimental effect of this orthosis on people's balance has been investigated. For this purpose, the desired orthosis was designed and manufactured. Then a data bank was created by the results of the experiments. To compile this data, the results of the experiments conducted by 10 volunteer students were used. In these tests, ear fluid and vision indicators were analyzed on the performance of people when using this orthosis. The findings of the studies are related to the study between people. According to the results of the tests, the use of the above orthosis improves the performance of people in the dynamic body, while the results of this research on static performance do not show any effect.

Keywords

Wearable orthoses, balance, walking, standing, sudden falls

Introduction

World health organization estimate the percentage of person's age 80 years or over is projected to jump to nearly 20 percent of the world's population by 2050. Sudden falls are one of the most leading cause of unintentional injury deaths worldwide in elderly. In recent years, numerous studies have been carried out on rehabilitation robots to help elderly people balance. In this study, the effects of a simple wearable exoskeleton has been investigated on human dynamic and static balance.

Methods

*: Corresponding author, hoseini.sabzevari@gonabad.ac.ir

Ten male students from Gonabad University between 18 to 22 years old are chosen among volunteers. They were in healthy physical condition, no history of neuromuscular diseases, no visual impairment, no lower limb injuries for the past three months and they were not selected for membership in the university sports teams. They were asked to not participate in any sport activity for at least 24 hours before experiments, do not take supplement and medicine for at least a week before experiments and be in a good mental conditions during the experiments. The effects of an orthosis were investigated experimentally on human dynamic and static balance with emphasis on vision and vestibular system.

Results

The results of experiments showed the influence of using the proposed orthosis on human balance. Although, wearing proposed orthosis cause decreasing 6.4% in static-vision, the dynamic-vision balance increase 4.65%. The effect of orthosis on static-vestibular system of balance was not perfectly preserve but cause increasing 10% on dynamic-vestibular system of balance.

Conclusion

Using the proposed passive orthosis increasing human balance as well as reducing the metabolic cost of walking. The results of the experiments show the importance of gastrocnemius muscles on human balance.