



Experimental investigation of forming AISI 304 stainless steel sheets using high water pressure

Farzad Rahmanil¹ , Seyed Jalal Hashemi*²

1. Assistant professor, Department of Mechanical Engineering, Kar Higher Education Institute, Qazvin, Iran

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

Abstract

In this study, the water jet incremental sheet forming (WJISF) process of AISI 304 stainless steel sheets was experimentally investigated. The primary objective was to study the effects of key process parameters, including pump pressure, nozzle feed rate, sheet thickness, and the type of backing/support material, on the final characteristics of the formed part. A full factorial design of experiments (DOE) was employed to ensure accurate experimental planning, and the results were evaluated using analysis of variance (ANOVA). Experiments were conducted on sheets with thicknesses of 1 and 1.5 mm, using two different auxiliary materials to enhance the energy transfer of the forming jet. The experimental results showed that pump pressure and nozzle feed rate are the most influential parameters on forming depth. Specifically, increasing the pressure from 70 to 80 bar resulted in a 37% increase in forming depth, whereas increasing the feed rate led to a reduction in the final forming depth. Furthermore, it was found that the nozzle diameter and the type of backing material have a direct influence on surface roughness and wall flatness. The application of molten copper slag as a backing material reduced bottom thinning, while the use of sand resulted in a decrease in deformation depth. Overall, the results indicate that water jet incremental sheet forming is an effective, flexible, and non-contact sheet metal forming technique, which can be considered a suitable alternative to conventional mechanical incremental forming processes such as single-point incremental forming (SPIF) and multi-point incremental forming (MPIF).

Keywords

Incremental Sheet Forming
Water Jet
AISI 304 Stainless Steel
Jet Pressure
Thinning

Received: 04.12.2025

Revised: 29.01.2026

Accepted: 21.02.2026

*Corresponding Author

Seyed Jalal Hashemi

Email

J_hashemi@tvu.ac.ir

1- Introduction

Metal forming, as one of the important methods in the manufacturing and production of industrial parts, plays a fundamental role in various industries, including automotive, aerospace, medical equipment, and precision instrument manufacturing. Among the various methods, incremental forming is considered a suitable alternative to traditional processes such as deep drawing and hydroforming due to its high flexibility and elimination of the need for expensive dies. Considering the development of fluid-based technologies and the need for high precision in

metal parts, the use of high-pressure water flow (waterjet) in forming was investigated as an alternative method.

Incremental sheet metal forming (ISF) has attracted the attention of researchers since the 1970s. Incremental sheet metal forming (ISF) is an emerging metal forming technology in which the tool motion is numerically controlled. This process is economical for forming complex parts in small to medium batches and offers a short and inexpensive

Cite this Article:

[1] F. Rahmani and S. J. Hashemi, "Experimental investigation of forming AISI 304 stainless steel sheets using high water pressure," *Science and Technology in Mechanical Engineering*, Vol. 5, No. 1, pp. 283–296, 2026. [Online]. Available: <https://doi.org/10.22034/stme.2026.564284.1192> (in Persian)



©2026 the authors. Published by Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International (CC BY-NC License) (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

E-ISSN: 2981-2232

method for forming products with relatively simple but interesting shapes [1].

Incremental sheet metal forming has been proposed as a flexible process for producing parts with complex geometries without the need for dedicated molds. Recent studies have shown that the use of water jets in this method can increase formability and prevent excessive thinning of aluminum and steel sheets [2].

Recent research has shown that the use of water jet in progressive sheet metal forming can increase the formability and enable more precise control of sheet deformation. Furthermore, analysis and optimization of process parameters in abrasive jet contour cutting have shown that the careful selection of parameters such as jet pressure, tool speed, and sheet thickness has a significant impact on the surface quality and geometric accuracy of parts. These results demonstrate the importance of controlling and optimizing process parameters to achieve better formability and higher surface quality in advanced sheet metal forming methods.

The results of the research show that the WJSMF process, in addition to eliminating the frictional problems of mechanical methods, is superior in terms of process parameter control, dimensional accuracy, and energy saving. However, challenges such as accurate determination of the effective pressure distribution, water jet stability, and its interaction with supporting materials still require more extensive research.

In this paper, a series of experimental tests were designed and conducted to investigate the effect of effective parameters on the additive forming process of steel sheets using a waterjet machine. In this method, a concentrated stream of high-pressure water replaced the rigid mechanical tool and was used as the agent for applying force to the sheet surface. The aim of this research was to investigate how the steel sheet gradually deforms under the influence of water pressure and to identify the optimal range of parameters to achieve geometric accuracy and high depth.

2- Research Methods

In the experiments, AISI 304 stainless steel sheet was used, which is one of the most widely used materials in forming processes due to its appropriate strength, high ductility and corrosion resistance. The thickness of the sheets was considered to be 1 and 1.5 mm in order to evaluate the effect of thickness on the amount of deformation and the final geometry of the part.

The forming process was carried out by a five-axis industrial waterjet machine shown in Figure 1. This machine was equipped with a high-pressure pump with a pressure generation capacity of up to 4000 bar and nozzles with an outlet diameter of 0.26 mm. The numerical control system of the machine (CNC) allowed precise adjustment of the nozzle movement path, distance from the sheet surface and feed rate. The waterjet nozzle was installed in such a way that its angle of impact with the sheet surface was 90 degrees and it was possible to change this angle in subsequent stages. The movement path of the water jet nozzle on the sheet was in a spiral with a fixed radial pitch of 1 mm.

After cutting the steel sheets into 200 x 200 mm dimensions, they were fixed on the support plate by special clamps to prevent slipping or vibration during the process. In some experiments, auxiliary materials were used to support the sheet. These materials included sea sand and copper slag, which were placed in layers behind the sheet to prevent tearing and distribute the energy of water impact more evenly. The use of these layers simulated the conditions of the “soft support mold” in traditional processes.



Figure 1: Five-axis industrial waterjet machine

3- Results

Figure 2 shows the trend of depth changes in response to different levels of the three main factors. As is clear from Figure, pressure plays the largest role in increasing the depth; as the pressure increases from 70 to 80 bar, the average depth increases continuously and significantly. This upward trend indicates that increasing the pressure causes more energy to be concentrated and, as a result, deeper penetration. In contrast, linear velocity has a decreasing effect on depth; as an increase in linear velocity from 2.4 to 4.0 mm/min leads to a significant decrease in depth. This behavior is logical and indicates that at higher speeds, the contact and impact time is reduced and therefore the depth created is less. The lower the nozzle speed, the greater the energy input to the sheet surface from the water jet and the higher the plastic deformation. A cut cross-section of one of the pieces is shown in Figure.

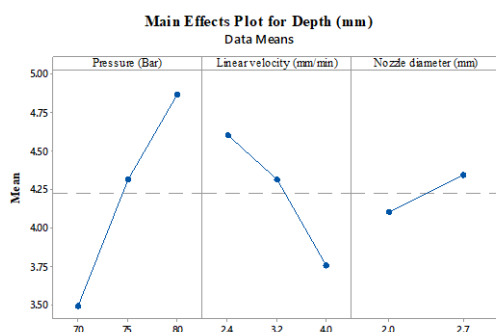


Figure 2: Diagram of the effect of parameters on the forming depth

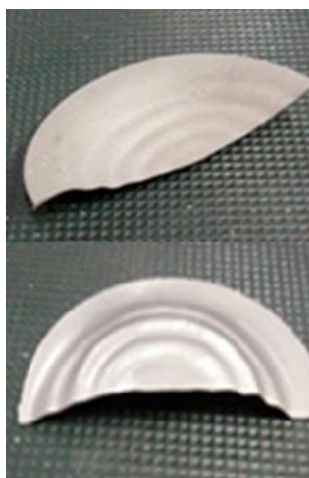


Figure 3: Sample formed at pressure of 80Bar pressure, nozzle diameter of 2.7 mm, and feed rate of 2.4 mm/min

4- Conclusion

In this study, the effect of process parameters on the incremental forming of stainless-steel sheets was investigated using an industrial waterjet machine. The results of the experiments showed that the pump pressure and the nozzle advance speed are the most important factors determining the deformation behavior in the WJISMF process. Increasing the pressure to 80 bar improved the forming depth and wall angle, while increasing the nozzle movement speed decreased these parameters due to the reduction in the contact time of the water flow with the sheet and, as a result, the water jet entering the sheet surface. Increasing the nozzle diameter also led to a more uniform distribution of force and smoother sheet forming. The type of auxiliary material also played an important role in the final quality of the part. The use of sand was able to help form parts with flatter walls and reduce wall stepping, but a higher forming depth was achieved using copper slag as a support material.

5- References

- [1] S. B. M. Echraf and M. Hrairi, "Research and progress in incremental sheet forming processes," *Materials and Manufacturing Processes*, Vol. 26, No. 11, pp. 1404–1414, 2011, DOI: [10.1080/10426914.2010.544817](https://doi.org/10.1080/10426914.2010.544817).
- [2] B. Lu, M. W. Mohamed Bazeer, J. F. Cao, S. Ai, J. Chen, H. Ou, and H. Long, "A study of incremental sheet forming by using water jet," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 91, No. 5–8, pp. 2291–2301, 2017, DOI: [10.1007/s00170-016-9869-5](https://doi.org/10.1007/s00170-016-9869-5)



بررسی تجربی شکل دهی ورق های فولادی زنگ نزن AISI 304 با استفاده از فشار بالای آب

فرزاد رحمنی^۱، سیدجلال هاشمی^{۲*}

۱- استادیار، مهندسی مکانیک، موسسه آموزش عالی کار، قزوین، ایران

۲- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه ملی مهارت، تهران، ایران

چکیده

در این مقاله، فرایند شکل دهی تدریجی ورق های فولادی زنگ نزن (AISI 304) با استفاده از جریان آب پرفشار (واتر جت) به صورت تجربی مورد بررسی قرار گرفت. هدف اصلی، مطالعه ای اثر پارامترهای کلیدی شامل فشار پمپ، سرعت پیشروی نازل، ضخامت ورق و نوع ماده ای کمکی بر ویژگی های نهایی قطعه شکل داده شده بوده است. به منظور طراحی دقیق آزمایش ها، از روش طرح عاملی کامل استفاده شد و نتایج با تحلیل واریانس ANOVA مورد ارزیابی قرار گرفت. آزمایش ها بر روی ورق های با ضخامت های ۱ و ۱/۵ میلی متر و با استفاده از دو نوع افزودنی جهت افزایش انرژی جت شکل دهنده انجام شد. نتایج آزمایش ها نشان داد که فشار پمپ و سرعت پیشروی نازل بیشترین تأثیر را بر عمق شکل دهی دارند؛ به گونه ای که افزایش فشار از ۷۰ به ۸۰ بار موجب رشد ۳۷ درصدی در عمق شکل دهی شده، در حالی که افزایش سرعت منجر به کاهش عمق نهایی گردید. همچنین مشخص شد که قطر نازل و جنس ماده کمکی تأثیر مستقیم بر زبری سطح و تخریب دیواره ها دارند. به کارگیری سرباره مذاب مس به عنوان ماده پشتیبان موجب کاهش نازک شدگی کف گردید. در مقابل، استفاده از شن و ماسه سبب کاهش عمق تغییر شکل شد. نتایج نشان داد که فرایند شکل دهی تدریجی با واتر جت روشی مؤثر، انعطاف پذیر و غیر تماشایی برای شکل دهی ورق های فلزی است که می تواند جایگزینی مناسب برای فرایندهای مکانیکی سنتی نظیر شکل دهی تدریجی تک نقطه ای و چند نقطه ای محسوب شود.

کلمات کلیدی

شکل دهی تدریجی ورق

واتر جت

فولاد زنگ نزن ۳۰۴

فشار جت

نازک شدگی

دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۰۹/۱۳

بازنگری مقاله: ۱۴۰۴/۱۱/۰۹

پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۱۲/۰۲

* نویسنده مسئول

سیدجلال هاشمی

ایمیل

J_hashemi@tvu.ac.ir

۱- مقدمه

شکل دهی فلزات به عنوان یکی از روش های مهم در ساخت و تولید قطعات صنعتی، نقش اساسی در صنایع مختلف از جمله خودروسازی، هوافضا، تجهیزات پزشکی و ساخت ابزار دقیق ایفا می کند. در میان روش های مختلف، شکل دهی تدریجی به دلیل انعطاف پذیری بالا و حذف نیاز به قالب های گران قیمت، جایگزین مناسبی برای فرایندهای سنتی همچون کشش عمیق و هیدروفرمینگ به شمار می رود. با توجه به گسترش فناوری های مبتنی بر سیال و نیاز به دقت بالا در قطعات فلزی، استفاده از جریان آب پرفشار (واتر جت) در شکل دهی به عنوان روشی جایگزین مورد بررسی قرار گرفت.

شکل دهی تدریجی ورق های فلزی (ISF) از دهه ۱۹۷۰ میلادی مورد توجه پژوهشگران قرار گرفت. شکل دهی تدریجی ورق (ISF) یک فناوری نوظهور شکل دهی فلزات است که در آن حرکت ابزار به صورت

عددی کنترل می شود. این فرایند برای شکل دهی قطعات پیچیده در دسته های کوچک تا متوسط اقتصادی است و روشی اقتصادی و انعطاف پذیر برای شکل دهی قطعات با هندسه های متنوع در تیراژ کم تا متوسط ارائه می دهد [۱].

شکل دهی تدریجی ورق به عنوان یک فرایند انعطاف پذیر در تولید قطعات با هندسه پیچیده بدون نیاز به قالب های اختصاصی مطرح شده است. مطالعات اخیر نشان داده اند که استفاده از جت آب در این روش می تواند قابلیت فرم دهی را افزایش داده و از نازک شدن بیش از حد ورق های آلومینیومی و فولادی جلوگیری کند [۲]. دوفالو و جئوسیت بررسی جامعی از مسائل شکل پذیری در این روش ارائه کرده و نقش پارامترهای فرایند مانند ضخامت ورق، مسیر حرکت ابزار و استراتژی فرم دهی را در کیفیت نهایی قطعه مورد تأکید قرار داده اند [۳].

Cite this Article:

[1] F. Rahmani and S. J. Hashemi, "Experimental investigation of forming AISI 304 stainless steel sheets using high water pressure," *Science and Technology in Mechanical Engineering*, Vol. 5, No. 1, pp. 283-296, 2026. [Online]. Available: <https://doi.org/10.22034/stme.2026.564284.1192> (in Persian)



©2026 the authors. Published by Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International (CC BY-NC License) (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

شاپای الکترونیکی: ۲۲۳۲-۲۸۸۱

از نوآوری‌های مؤثر در این زمینه، استفاده از واترجت (Water Jet) به عنوان ابزار شکل‌دهی است.

در شکل ۱، نمای کلی از سامانه‌ی شکل‌دهی با فشار آب را نمایش می‌دهد. قطر نازل، فشار پمپ و سرعت پیشروی خطی نازل از پارامترهای قابل کنترل در فرایند هستند.

تحقیقات اخیر نشان داده‌اند که استفاده از جت آب در فرم‌دهی تدریجی ورق می‌تواند قابلیت فرم‌دهی را افزایش داده و کنترل دقیق‌تر تغییر شکل ورق را امکان‌پذیر کند [۱۲]. علاوه بر این، تحلیل و بهینه‌سازی پارامترهای فرایند در برش کانتور با جت ساینده نشان داده است که انتخاب دقیق پارامترهایی مانند فشار جت، سرعت حرکت ابزار و ضخامت ورق تأثیر قابل توجهی بر کیفیت سطح و دقت هندسی قطعات دارد [۲]. این نتایج اهمیت کنترل و بهینه‌سازی پارامترهای فرایند را برای دستیابی به فرم‌پذیری بهتر و کیفیت سطح بالاتر در روش‌های پیشرفته فرم‌دهی ورق نشان می‌دهد.

هی و همکاران [۱۳] با استفاده از شبیه‌سازی CFD کارایی فرایند شکل‌دهی با فشار آب را برای شکل دادن ورق‌های فلزی مورد بررسی عددی قرار دادند. در سال‌های اخیر، تحقیقات جدیدی بر روی بهبود کارایی فرایند شکل‌دهی تدریجی با واترجت متمرکز شده‌اند. وی و همکاران [۱۴] با استفاده از واترجت افزایشی در تولید بلوز فلزی (bellows) نشان دادند که این فرایند قادر است هندسه‌های موج‌دار و نازک را با یکنواختی بالا و بدون تماس مکانیکی تولید کند. در پژوهش‌های وی و همکاران [۱۵]، اثر استفاده از قالب‌های پشتیبان در فرایند میکروفورمینگ با واترجت بررسی شد و نتایج حاکی از افزایش دقت هندسی و کاهش نازک‌شدگی در نمونه‌های فولادی بود.

مطالعه‌ی عددی و تجربی انجام‌شده توسط جوریس و همکاران [۱۶] نشان داد که رفتار جریان واترجت در ناحیه تماس با ورق، تأثیر مستقیم بر توزیع تنش و نرخ تغییر شکل دارد. جوریس و همکاران [۱۷] با معرفی ابزارهای پشتیبان لایه‌ای (laminated tools)، موفق به افزایش پایداری و جلوگیری از تغییر شکل ناخواسته در فرایند واترجت فرمینگ شدند.

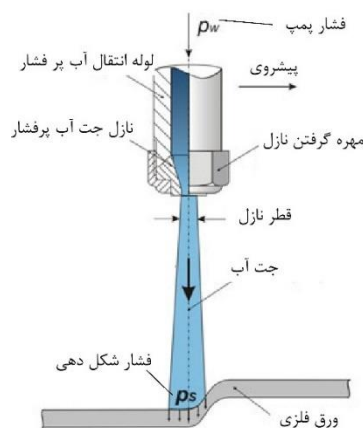
در سطح میکرو، شی و همکاران [۱۸] فرایند شکل‌دهی میکرو با واترجت پرسرعت را برای ورق‌های فولادی زنگ‌زن توسعه دادند و گزارش کردند که این روش می‌تواند جایگزینی دقیق برای روش‌های مکانیکی در مقیاس کوچک باشد.

جمع‌بندی نتایج پژوهش‌ها نشان می‌دهد که فرایند WJISMF، علاوه بر حذف مشکلات اصطکاکی روش‌های مکانیکی، از نظر کنترل

همچنین شیم و پارک نشان داده‌اند که انتخاب دقیق پارامترهای فرایند می‌تواند دقت هندسی و کیفیت سطح ورق‌های آلومینیومی را به‌طور قابل توجهی بهبود بخشد [۴]. در حالی که در تحقیقات پیشین شکل‌دهی تدریجی، از ماشین‌های فرز برای حرکت ابزار استفاده می‌شد در مقالات جدید استفاده از ربات‌های با پنج درجه آزادی نیز مورد توجه قرار گرفته است [۵ و ۶].

علاوه بر شکل‌دهی تدریجی متداول، شکل دادن تدریجی نامتقارن (AISF) نیز معرفی شده است تا فرایند تغییر شکل را بهینه کرده و شکل‌پذیری بالاتری برای قطعات پیچیده فراهم کند [۷]. همچنین چرخش ابزار تأثیر قابل توجهی بر جریان ماده و کیفیت سطح ورق دارد و می‌تواند باعث کاهش نازک شدن موضعی و بهبود شکل‌پذیری کلی شود [۸]. این پیشرفت‌ها به‌طور کلی اهمیت کنترل دقیق فرایند و بهینه‌سازی پارامترها را برای استفاده کامل از قابلیت‌های روش‌های فرم‌دهی ورق تدریجی در تولیدات پیشرفته نشان می‌دهند.

شکل‌دهی تدریجی تک‌نقطه‌ای بر روی لوله‌های فلزی نیز انجام شده است. در این فرایند، معمولاً شکل‌دهی از سطح داخلی لوله انجام می‌شود [۹] در جهت افزایش شکل‌پذیری لوله‌های آلومینیومی می‌توان فرایند را در دماهای بالا نیز انجام داد [۱۰]. هاشمی و همکاران، حد شکل‌پذیری لوله‌های آلومینیومی AA6063 را در فرایند شکل‌دهی تدریجی با استفاده از معیارهای شکست مختلف به‌دست آوردند. در این پژوهش، شکل‌دهی لوله به صورت بالچ متقارن با استفاده از ابزار دورانی داخل لوله انجام شد [۱۱].



شکل ۱: شماتیک فرایند شکل‌دهی با فشار آب

با وجود مزایای زیاد، فرایند شکل‌دهی تدریجی سنتی به دلیل تماس مستقیم ابزار فلزی با ورق، محدودیت‌هایی از قبیل اصطکاک زیاد، چروکیدگی و احتمال پارگی در ورق‌های نازک دارد. این مسئله موجب شد پژوهشگران به دنبال جایگزینی برای ابزار صلب باشند. یکی

۶ دور کامل می باشد. شکل ۳ شماتیک مسیر مارپیچ نازل را نمایش می دهد. نحوه گیره بندی ورق در زمان شکل دهی نیز در شکل ۴ نشان داده شده است.

ورق های فولادی پس از برش در ابعاد ۲۰۰×۲۰۰ میلی متر، به وسیله گیره های مخصوص روی صفحه نگهدارنده ثابت شدند تا از لغزش یا ارتعاش در حین فرایند جلوگیری شود. در برخی آزمایش ها از مواد کمکی برای پشتیبانی از ورق استفاده گردید. این مواد شامل شن دریا و سرباره می بودند که به صورت لایه ای در پشت ورق قرار گرفتند تا علاوه بر جلوگیری از پارگی، انرژی برخورد آب را به صورت یکنواخت تر توزیع کنند. استفاده از این لایه ها باعث شبیه سازی شرایط وجود «قالب پشتیبان نرم» در فرایندهای سنتی شد. سرباره مس به دلیل دانسیته بالاتر، اصطکاک داخلی کمتر و قابلیت انتقال یکنواخت انرژی، به عنوان ماده پشتیبان انتخاب شد. این ویژگی ها موجب کاهش تمرکز تنش موضعی و امکان دستیابی به عمق شکل دهی بیشتر نسبت به ماسه دریا می شود. شماتیک شکل نهایی ورق شکل داده شده در شکل ۵ مشاهده می شود. با حرکت مارپیچ جت آب روی سطح ورق و انتقال انرژی جنبشی آب به آن، تغییر شکل پلاستیک روی ورق رخ داده و یک شکل مخروطی با عمیق مشخص ایجاد می شود. عمق شکل داده شده و ضخامت نهایی کف مخروط نشان دهنده ظرفیت این فرایند برای شکل دهی ورق فلزی می باشد.



شکل ۲: دستگاه واتر جت صنعتی پنج محوره

پارامترهای فرایند، دقت ابعادی و صرفه جویی انرژی نیز برتری دارد. با این حال، چالش هایی مانند تعیین دقیق توزیع فشار مؤثر، پایداری جت آب و اثر متقابل آن با مواد پشتیبان همچنان نیازمند تحقیقات گسترده تری است.

با وجود مطالعات انجام شده در زمینه شکل دهی تدریجی ورق و استفاده از واتر جت در فرایندهای شکل دهی، هنوز درک جامعی از اثر هم زمان پارامترهای کلیدی فرایند شامل فشار جت، سرعت پیشروی نازل، قطر نازل و نوع ماده پشتیبان بر رفتار تغییر شکل ورق های فولادی زنگ نزن وجود ندارد. به ویژه، نقش مواد پشتیبان دانه ای در کنترل عمق شکل دهی و نازک شدگی کف قطعه کمتر به صورت تجربی مورد بررسی قرار گرفته است. از این رو، انجام پژوهشی نظام مند برای تحلیل این پارامترها و تعیین شرایط بهینه فرایند ضروری به نظر می رسد.

نوآوری اصلی این پژوهش، بررسی تجربی و آماری فرایند شکل دهی تدریجی ورق فولاد زنگ نزن AISI 304 با استفاده از واتر جت و تحلیل هم زمان اثر پارامترهای فرایندی و نوع ماده پشتیبان است. برخلاف روش های مکانیکی متداول که با تماس مستقیم ابزار و ورق همراه هستند، روش پیشنهادی امکان شکل دهی غیرتماسی، کاهش اصطکاک و کنترل بهتر نازک شدگی را فراهم می کند و به ویژه برای ورق های نازک و قطعات با دقت هندسی بالا مزیت دارد.

۲- بخش تجربی و آزمایش ها

۲-۱- دستگاه و ابزارها

در آزمایش ها از ورق فولادی زنگ نزن نوع AISI 304 استفاده گردید که به دلیل استحکام مناسب، شکل پذیری بالا و مقاومت به خوردگی، یکی از پرکاربردترین مواد در فرایندهای شکل دهی است. ضخامت ورق ها ۱ و ۱/۵ میلی متر در نظر گرفته شد تا بتوان اثر ضخامت بر میزان تغییر شکل و هندسه نهایی قطعه را نیز ارزیابی کرد.

فرایند شکل دهی توسط دستگاه واتر جت صنعتی پنج محوره نشان داده شده در شکل ۲ انجام شد. این دستگاه مجهز به پمپ فشار بالا با توان تولید فشار تا ۴۰۰۰ بار و نازل هایی با قطر خروجی ۰/۲۶ میلی متر بود. سیستم کنترل عددی دستگاه (CNC) امکان تنظیم دقیق مسیر حرکت نازل، فاصله از سطح ورق و سرعت پیشروی را فراهم می کرد. نازل واتر جت به گونه ای نصب شد که زاویه ی برخورد آن با سطح ورق ۹۰ درجه بوده است. مسیر حرکت نازل جت آب بر روی ورق به صورت مارپیچ با گام ثابت شعاعی ۲ میلی متر بوده است. مسیر حرکتی شامل

جدول ۱: پارامترهای مورد استفاده در آزمایش‌های تجربی فرایند شکل‌دهی تدریجی با دستگاه واترجت

پارامتر	واحد	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۳
سرعت خطی نازل	[mm/min]	۲/۴	۳/۲	۴
فشار دستگاه	[bar]	۷۰	۷۵	۸۰
قطر داخلی نازل	[mm]	۲	۲/۷	

با استفاده از نرم‌افزار Minitab، طرح عاملی کامل با ۳ سطح فشار، ۳ سطح سرعت و دو قطر داخلی نازل برای یک ضخامت ورق استیل ۳۰۴ طراحی و اجرا شد. هدف از این طراحی، تعیین تأثیر هم‌زمان پارامترها بر پاسخ‌های فرایند و یافتن شرایط بهینه شکل‌دهی بود.

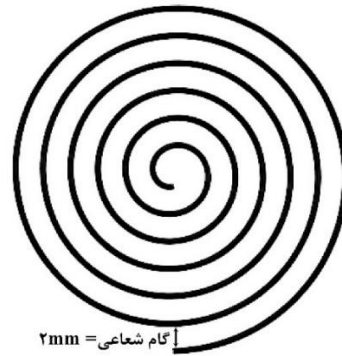
۳- نتایج و بحث

۳-۱- نتایج طراحی آزمایش

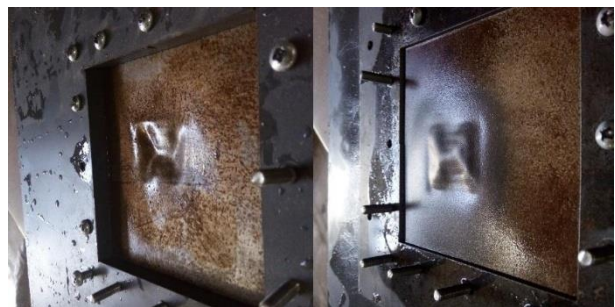
داده‌های حاصل از ۱۸ آزمایش تجربی در جدول زیر ارائه شده‌اند. آزمایش‌ها به صورت تصادفی انجام شدند تا اثر خطای سیستماتیک کاهش یابد. جدول ۲ داده‌های آزمایش با ترتیب تصادفی است که با سرعت پیشروی ۲/۴، ۳/۲ و ۴ میلی‌متر بر دقیقه و فشار ۷۰، ۷۵، ۸۰ بار با دو نازل به قطر داخلی ۲ و ۲/۷ میلی‌متر در شکل‌دهی با دستگاه واترجت روی ورق استیل ۳۰۴ به ضخامت ۱ میلی‌متر انجام شده است. مقطع برش خورده یکی از قطعات مطابق با آزمایش شماره ۴ در شکل ۶ نشان داده شده است.



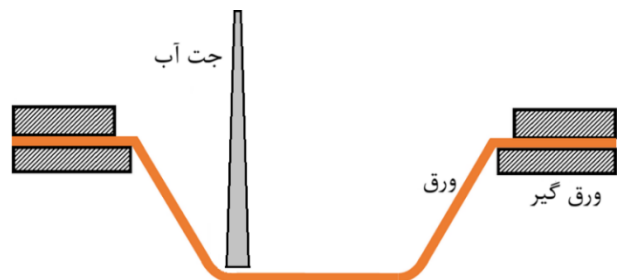
شکل ۶: نمونه شکل داده شده با فشار ۸۰ بار، نازل ۲/۷ میلی‌متری و پیشروی ۲/۴ میلی‌متر بر دقیقه



شکل ۳: مسیر حرکتی نازل روی سطح ورق و الگوی شکل‌دهی تدریجی



شکل ۴: نحوه گیره‌بندی و تثبیت ورق در زمان شکل‌دهی



شکل ۵: شماتیک مخروط شکل داده شده با جت آب

۲-۲- طراحی آزمایش

آزمایش‌ها با هدف بررسی تأثیر پارامترهای اصلی فرایند بر ویژگی‌های شکل‌دهی، بر اساس روش طراحی عاملی کامل (Full Factorial Design) و با بهره‌گیری از نرم‌افزار Minitab انجام شدند. در این روش، تمام ترکیب‌های ممکن از سطوح پارامترها در نظر گرفته می‌شود تا تأثیر متقابل آن‌ها بر پاسخ‌های نهایی (عمق شکل‌دهی، ضخامت کف) به صورت دقیق ارزیابی شود. در این پژوهش چهار پارامتر مؤثر اصلی شامل سرعت حرکت نازل، فشار دستگاه، قطر داخلی نازل و ضخامت ورق مورد بررسی قرار گرفت. همچنین، از دو نوع ماده کمکی شامل سرباره مذاب مس و شن و ماسه دریا به عنوان محیط پشتیبان استفاده شد تا اثر نوع ماده بر شکل‌پذیری ارزیابی گردد.

جدول ۲: داده های آزمایش با اعمال ترتیب تصادفی

شماره آزمایش	فشار (Bar)	سرعت پیشروی (mm/min)	قطر نازل (mm)	عمق (mm)	ضخامت (mm)
۱	۷۰	۳/۲	۲	۳/۵	۰/۸۲
۲	۸۰	۳/۲	۲	۵/۱	۰/۶۳
۳	۷۵	۴	۲	۴	۰/۷۲
۴	۸۰	۲/۴	۲/۷	۵/۸	۰/۵۸
۵	۸۰	۴	۲	۴	۰/۷۱
۶	۷۰	۲/۴	۲/۷	۳/۹	۰/۷۶
۷	۷۵	۳/۲	۲/۷	۴/۶	۰/۶۸
۸	۷۵	۲/۴	۲	۴	۰/۷۴
۹	۷۰	۴	۲	۳/۰۵	۰/۸۶
۱۰	۷۰	۴	۲/۷	۳/۲	۰/۸۶
۱۱	۸۰	۳/۲	۲/۷	۴/۹	۰/۶۶
۱۲	۸۰	۴	۲/۷	۴/۸	۰/۷۵
۱۳	۷۵	۳/۲	۲	۴/۲	۰/۷۳
۱۴	۷۰	۳/۲	۲/۷	۳/۶	۰/۸۱
۱۵	۸۰	۲/۴	۲	۵/۳	۰/۶
۱۶	۷۵	۲/۴	۲/۷	۴/۸	۰/۶۷
۱۷	۷۵	۴	۲/۷	۴/۲	۰/۷۱
۱۸	۷۰	۲/۴	۲	۳/۷	۰/۷۸

جدول ۳: تجزیه و تحلیل واریانس برای عمق شکل دهی

Source	DF	Seq SS	Contribution (%)	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	9	8.9168	97.01%	8.9168	0.99076	28.88	0.000
Linear	5	8.2051	89.27%	8.2051	1.64103	47/87	0.000
Pressure (Bar)	2	5.7475	62.53%	5.7475	2.87375	83/77	0.000
Linear velocity (mm/min)	2	2.2008	23.94%	2.2008	1.10042	32/08	0.000
Nozzle diameter (mm)	1	0.2568	2.79%	0.2568	0.25681	7/49	0.026
2-Way	4	0.7117	7.74%	0.17792	0.17792	5/19	0.023
Pressure (Bar)*Linear velocity (mm/min)	4	0.7117	7.74%	0.17792	0.17792	5/19	0.023
Error	8	0.2744	2.99%	0.2744	0.03431		
Total	17	9.1913	100.00%				

غلبه فشار جت آب بر عمق شکل دهی را می توان به نقش مستقیم آن در افزایش انرژی جنبشی جریان و تنش اعمالی بر سطح ورق نسبت داد. افزایش فشار موجب افزایش مومنتوم جت و در نتیجه تمرکز تنش بالاتر در ناحیه برخورد می شود که فعال سازی مکانیزم تغییر شکل پلاستیک را تسهیل می کند. در مقابل، سرعت خطی نازل از طریق کنترل زمان تماس جت با ورق بر میزان انتقال انرژی اثر می گذارد، به طوری که در سرعت های بالاتر، کاهش زمان اثر گذاری منجر به افت عمق شکل دهی می شود.

نمودار مقادیر پیش بینی شده در مقابل مقادیر واقعی در شکل ۷ نشان داده شده است. نقاط نزدیک تر به خط، پیش بینی دقیق تری از مدل را نشان می دهند.

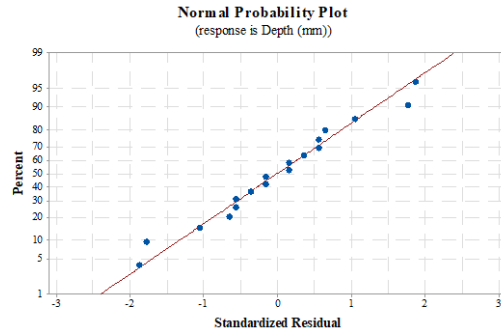
۳-۲- تحلیل آماری نتایج بر روی عمق شکل دهی

نتایج ANOVA جدول ۳ نشان می دهد که مدل آماری به کار رفته توانسته است بخش بسیار قابل توجهی از تغییرات پاسخ را تبیین کند؛ به طوری که مقدار R-sq برابر ۹۷/۰۱٪ بوده و در کنار R-sq(adj)=93.65٪ و R-sq(pred)=84.88٪ نشان از برازش مطلوب، پایداری مناسب و قدرت پیش بینی قابل قبول مدل دارد.

در میان عوامل مورد بررسی، فشار جت آب، بیشترین اثر را با سهم ۶۲/۵۳٪ بر روی عمق شکل دهی داشته و به عنوان مهم ترین متغیر مؤثر بر پاسخ شناخته می شود. پس از آن، سرعت خطی با سهم ۲۳/۹۴٪ نقش بیشتری در تغییرات عمق شکل دهی دارد. اگرچه سهم قطر نازل کمتر است (حدود ۲/۷۹٪)، اما همچنان اثر آن از نظر آماری معنادار گزارش شده است. در کنار اثرات اصلی، برهم کنش دو عاملی بین فشار و سرعت خطی نیز معنادار بوده و سهم قابل توجهی (۷/۷۴٪) از واریانس

جدول ۴: تجزیه و تحلیل واریانس برای ضخامت شکل‌دهی

Source	DF	Seq SS	Contribution (%)	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Source	9	0.108450	95.78%	0.108450	0.012050	20.18	0.000
Model	5	0.099694	88.05%	0.099694	0.019939	33.39	0.000
Linear	2	0.079644	70.34%	0.079644	0.039822	66.68	0.000
Pressure (Bar)	2	0.019378	17.11%	0.019378	0.009689	16.22	0.002
Linear velocity (mm/min)	1	0.000672	0.59%	0.000672	0.000672	1.13	0.320
Nozzle diameter (mm)	4	0.008756	7.73%	0.008756	0.002189	3.67	0.056
2-Way	4	0.008756	7.73%	0.008756	0.002189	3.67	0.056
Pressure (Bar)*Linear velocity (mm/min)	8	0.004778	4.22%	0.004778	0.000597		
Error	17	0.113228	100.00%				



شکل ۷: نمودار احتمال نرمال برای مقادیر عمق شکل‌دهی

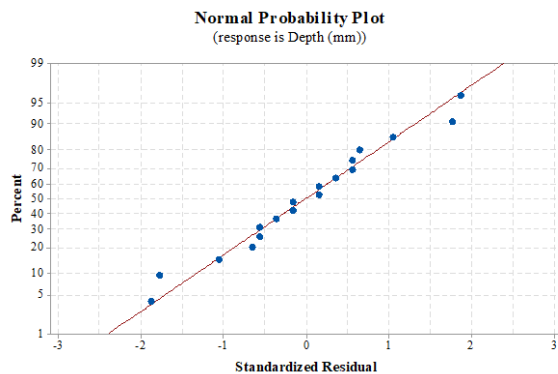
۳-۳- تحلیل آماری نتایج بر روی ضخامت شکل‌دهی

جدول ۴ نتایج تحلیل واریانس مربوط به مدل آماری ضخامت را نشان می‌دهد و بیان می‌کند که مدل توانسته مقدار قابل توجهی از تغییرات پاسخ را توضیح دهد. مقدار R-sq برابر ۹۵/۷۸٪ و همچنین R-sq(adj)=91.03٪ و R-sq(pred)=78.64٪ حاکی از آن است که مدل برازش خوبی داشته و توانایی پیش‌بینی مناسبی دارد. از طرفی، سهم خطا تنها ۴/۲۲٪ بوده که این موضوع نیز کیفیت مناسب مدل را تأیید می‌کند.

بررسی سهم عوامل مختلف نشان می‌دهد که فشار بیشترین تأثیر را بر پاسخ دارد؛ به طوری که با سهم ۷۰/۳۴٪ مهم‌ترین عامل شناخته می‌شود و مقدار $P=0.000$ نیز نشان می‌دهد که اثر آن کاملاً معنادار است. سرعت خطی نیز با سهم ۱۷/۱۱٪ تأثیر قابل توجهی بر پاسخ دارد و اثر آن از نظر آماری معنادار است ($P=0.002$). در مقابل، قطر نازل تأثیر ناچیزی دارد و مقدار $P=0.320$ نشان می‌دهد که اثر آن معنادار نیست. علاوه بر این، اثر متقابل سرعت خطی و فشار حدود ۷/۷۳٪ از تغییرات را تشکیل می‌دهد و اگرچه مقدار P آن (۰/۰۵۶) در مرز معناداری قرار دارد، اما همچنان نشان می‌دهد که تغییر هم‌زمان این دو عامل می‌تواند بر رفتار سیستم اثرگذار باشد.

در مجموع، نتایج جدول، به‌خوبی نشان می‌دهد که فشار و سرعت خطی دو عامل اصلی و تعیین‌کننده در مدل هستند و مدل آماری به‌طور کلی عملکرد مناسبی در توصیف و پیش‌بینی تغییرات پاسخ دارد.

نمودار مقادیر پیش‌بینی‌شده در مقابل مقادیر واقعی در شکل ۸ نشان داده شده است. نقاط نزدیک‌تر به خط، پیش‌بینی دقیق‌تری از مدل را نشان می‌دهند.



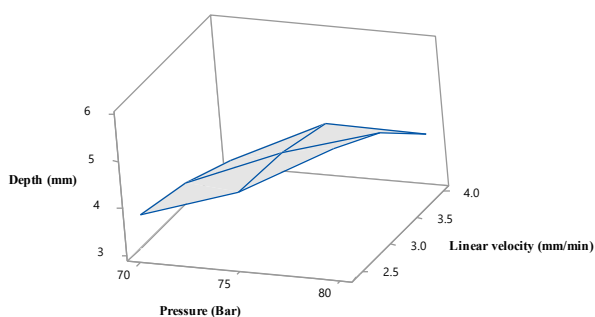
شکل ۸: نمودار احتمال نرمال برای مقادیر ضخامت شکل‌دهی

۳-۴- بحث بر روی نتایج طراحی آزمایش

شکل ۹ روند تغییرات عمق را در پاسخ به سطوح مختلف سه عامل اصلی نشان می‌دهد. همان‌گونه که از شکل ۹ مشخص است، فشار بیشترین نقش را در افزایش عمق دارد؛ به طوری که با افزایش فشار از ۷۰ به ۸۰ بار، میانگین عمق به‌صورت پیوسته و قابل توجهی افزایش می‌یابد. این روند صعودی نشان می‌دهد که افزایش فشار موجب تمرکز انرژی بیشتر و در نتیجه نفوذ عمیق‌تر می‌شود. در مقابل، سرعت خطی اثر کاهشی بر عمق دارد؛ به این صورت که افزایش سرعت خطی از ۲/۴ به ۴/۰ mm/min منجر به کاهش قابل توجه عمق می‌شود. این رفتار منطقی بوده و بیانگر آن است که در سرعت‌های بالاتر، زمان تماس و

سرعت های بالاتر، شیب افزایش عمق کمتر شده و حساسیت سیستم نسبت به فشار کاهش می یابد.

به طور مشابه، اثر سرعت خطی نیز وابسته به میزان فشار است. در فشارهای پایین، افزایش سرعت خطی کاهش مشخصی در عمق ایجاد می کند، اما در فشارهای بالا شدت این کاهش کمتر است. این رفتار نشان می دهد که دو عامل اثر ترکیبی بر پاسخ دارند و نمی توان اثر آن ها را به صورت مستقل از یکدیگر تفسیر کرد. در مجموع، نمودار بیان می کند که شرایط بهینه عمق در ناحیه ای با فشار بالا و سرعت خطی پایین به دست می آید که این نتیجه با یافته های ANOVA و نمودار اثرات اصلی نیز هم راستا است.



شکل ۱۰: اثر متقابل فشار و سرعت خطی را بر عمق شکل دهی

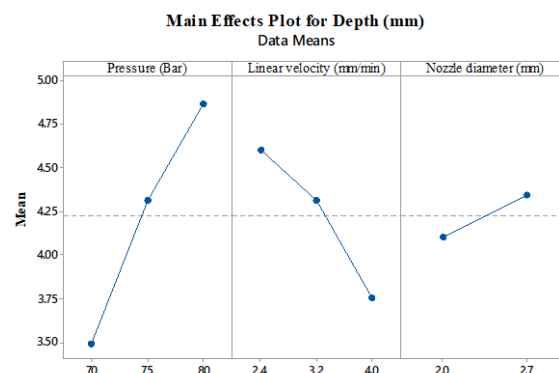
رفتار مشاهده شده نشان می دهد که اثر فشار و سرعت خطی مستقل از یکدیگر نیست. در سرعت های پایین، افزایش فشار موجب افزایش چشمگیر عمق شکل دهی می شود، زیرا انرژی جت به طور مؤثرتری به ورق منتقل می گردد؛ اما در سرعت های بالا، کاهش زمان تماس سبب می شود که افزایش فشار نتواند به همان میزان عمق شکل دهی را افزایش دهد. این موضوع بیانگر ماهیت غیرخطی فرایند و اهمیت تنظیم هم زمان فشار و سرعت برای دستیابی به شرایط بهینه شکل دهی است.

شکل ۱۱ تأثیر اصلی عوامل مختلف بر ضخامت را نشان می دهد. با نگاه به نمودار می بینیم که فشار بیشترین نقش را دارد؛ به این معنی که وقتی فشار از ۷۰ به ۸۰ بار افزایش پیدا می کند، ضخامت به طور چشمگیری کاهش می یابد. این افت شدید نشان می دهد که سیستم نسبت به تغییرات فشار بسیار حساس است و افزایش فشار باعث اعمال نیروی بیشتر و در نتیجه کاهش ضخامت لایه می شود.

از طرف دیگر، سرعت خطی رفتاری برعکس فشار دارد. با بالا رفتن سرعت از ۲/۴ به ۴ میلی متر بر دقیقه، ضخامت بیشتر می شود که می تواند به دلیل زمان کمتر برای پخش شدن ماده یا نحوه توزیع آن

اثرگذاری کاهش یافته و بنابراین عمق ایجاد شده کمتر می شود. هر چقدر سرعت نازل کمتر باشد انرژی وارد شده به سطح ورق از طرف جت آب بیشتر بوده و تغییر شکل پلاستیک بالاتری را ایجاد خواهد کرد.

قطر نازل نیز اگرچه کم اثرترین عامل است، اما همچنان روندی افزایشی را نشان می دهد؛ به طوری که افزایش قطر از ۲/۰ به ۲/۷ mm موجب افزایش ملایم عمق می شود. این تغییرات بیان می کند که نازل بزرگتر جریان مؤثرتری ایجاد کرده و نفوذ را اندکی افزایش می دهد. با افزایش قطر نازل، سطح بیشتری از ورق با جت آب در تماس است و انرژی جت روی سطح بیشتری تقسیم شده و تغییر شکل پلاستیک بالاتری ایجاد خواهد شد. در مجموع، نمودار نشان می دهد که عمق حداکثری در شرایط فشار بالا، سرعت خطی پایین و قطر نازل بزرگتر به دست می آید که این نتایج کاملاً با تحلیل ANOVA و سهم عوامل در مدل هم خوان است.



شکل ۹: نمودار اثر بخشی پارامترها بر عمق شکل دهی

از دیدگاه مکانیکی، کاهش سرعت پیشروی نازل موجب افزایش مدت زمان اعمال بار هیدرودینامیکی بر یک ناحیه مشخص از ورق می شود. این افزایش زمان تماس باعث انتقال انرژی بیشتر به ماده و در نتیجه افزایش کرنش پلاستیک تجمعی می گردد؛ بنابراین، در سرعت های پایین تر، تغییر شکل پلاستیک عمیق تری در ورق ایجاد می شود که این موضوع با نتایج تجربی کاملاً هم خوان است.

شکل ۱۰، اثر متقابل فشار و سرعت خطی را بر عمق نشان می دهد و بیان می کند که چگونه تغییر هم زمان این دو عامل می تواند پاسخ را تحت تأثیر قرار دهد. همان طور که در سطح ترسیم شده مشخص است، افزایش فشار به طور کلی موجب افزایش عمق می شود؛ اما میزان این افزایش وابسته به مقدار سرعت خطی است. در سرعت های پایین، افزایش فشار منجر به رشد قابل توجه عمق می شود، در حالی که در

۳-۵- بررسی اثر استفاده از ماده پشتیبان

به منظور تحلیل تجربی اثر استفاده از ماده پشتیبان زیر ورق، هشت نمونه با ترکیب‌های متفاوت از جنس ماده‌ی کمکی، قطر نازل و ضخامت ورق مورد آزمایش قرار گرفتند. در تمامی آزمایش‌ها، فشار پمپ ۸۰ بار، فاصله‌ی نازل از سطح ورق ۱۵ سانتی‌متر و سرعت خطی نازل ۲/۴ میلی‌متر بر دقیقه ثابت نگه داشته شد تا اثر سایر متغیرها به طور مستقل بررسی شود. قابل ذکر است که هر دو ماده پشتیبان از الک آزمایشگاهی مش ۸۰ میکرون عبور داده شده‌اند.

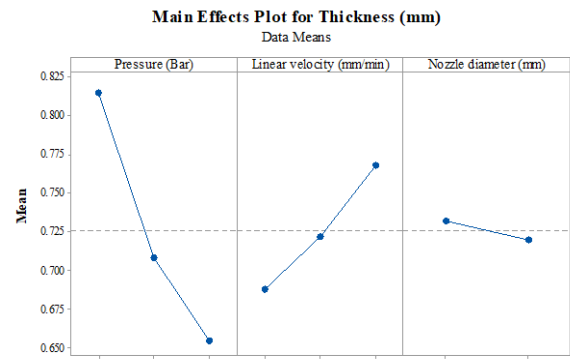
خلاصه نتایج به دست آمده برای استفاده از ماده پشتیبان زیر ورق در جدول ۵ آمده است. نتایج نشان می‌دهد که افزایش ضخامت باعث کاهش عمق شکل‌دهی می‌شود. از طرف مقایسه نتایج شکل‌دهی با ماده پشتیبان نسبت به جدول ۲ نشان می‌دهد که استفاده از ماده پشتیبان، عمق شکل داده شده را کمتر می‌کند.

جدول ۵: نتایج آزمایش‌های بررسی اثر ماده پشتیبان

شماره آزمایش	ضخامت ورق (mm)	نوع ماده پشتیبان	قطر نازل (mm)	عمق شکل داده شده (mm)	ضخامت کف (mm)
B1	۱	ماسه دریا	۲	۵/۱	۰/۶۵
B2	۱	سرباره مس	۲	۵/۲	۰/۶۲
B3	۱	ماسه دریا	۲/۷	۵/۶	۰/۶۰
B4	۱	سرباره مس	۲/۷	۵/۷	۰/۶۰
B5	۱/۵	ماسه دریا	۲	۴/۲	۱/۰۵
B6	۱/۵	سرباره مس	۲	۴/۳	۱/۰۳
B7	۱/۵	ماسه دریا	۲/۷	۴/۴	۱/۰۳
B8	۱/۵	سرباره مس	۲/۷	۴/۴	۱/۰۱

تعدادی از قطعات شکل‌دهی شده در شکل ۱۳ ارائه شده‌اند. همان‌گونه که در این شکل مشاهده می‌شود، نتایج حاصل نشان می‌دهند که استفاده از سرباره مس، در مقایسه با ماسه دریا، امکان دستیابی به عمق شکل‌دهی بیشتری را فراهم می‌کند. با افزایش عمق شکل‌دهی نازک‌شدگی کف قطعه نیز بیشتر می‌شود. افزایش قطر نازل بدون در نظر گرفتن نوع ماده پشتیبان، باعث افزایش عمق شکل‌دهی شده است؛ زیرا با افزایش قطر نازل، فشار مساحت برخورد جت آب با سطح ورق بیشتر شده و امکان شکل‌دهی بالاتر را فراهم می‌کند. از طرف دیگر، این افزایش سطح برخورد، کمک می‌کند دیواره قطعه سطح تخت‌تری را داشته باشد و اثر پله‌ای شدن کمتر مشاهده شود. چسبندگی و اصطکاک بین ذرات ماسه دریا، از حرکت آن‌ها در اثر فشار جت آب جلوگیری کرده و اجازه نمی‌دهد که عمق‌های بالاتر

باشد. در نهایت، قطر نازل کمترین تأثیر را دارد و تغییرات ضخامت در این بخش بسیار جزئی است؛ بنابراین، برای کنترل بهتر ضخامت، تنظیم فشار و سرعت اهمیت بیشتری دارد و قطر نازل نقش فرعی‌تری ایفا می‌کند.

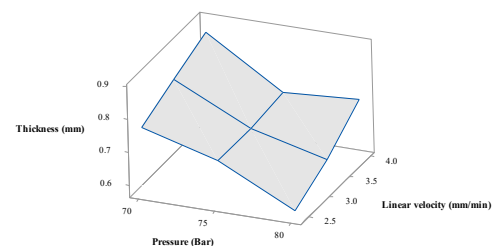


شکل ۱۱: نمودار اثر بخشی پارامترها بر ضخامت کف قطعه

کاهش ضخامت کف قطعه با افزایش فشار جت آب ناشی از افزایش تنش کششی در ناحیه مرکزی ورق و تشدید جریان ماده به سمت دیواره‌ها است. در فشارهای بالاتر، ماده تحت کرنش‌های پلاستیک شدیدتری قرار می‌گیرد که منجر به نازک‌شدگی موضعی در کف قطعه می‌شود. در مقابل، افزایش سرعت خطی با محدود کردن زمان انتقال انرژی، از شدت این پدیده می‌کاهد.

شکل ۱۲ نشان می‌دهد که ضخامت با ترکیب فشار و سرعت خطی تغییر می‌کند، نه فقط با یکی از آن‌ها. وقتی فشار پایین است، افزایش سرعت خطی باعث زیاد شدن ضخامت می‌شود؛ اما وقتی فشار بالا می‌رود، این تأثیر کمتر می‌شود و ضخامت کاهش پیدا می‌کند.

Surface Plot of Thickness (mm) vs Linear velocity, Pressure (Bar)



شکل ۱۲: اثر متقابل فشار و سرعت خطی را بر ضخامت کف قطعه

به همین دلیل می‌بینیم که این دو عامل روی هم اثر می‌گذارند؛ یعنی تغییر سرعت خطی در فشارهای مختلف نتیجه یکسانی ندارد. پس اگر بخواهیم به ضخامت دلخواه برسیم، باید فشار و سرعت خطی را با هم تنظیم کنیم، چون هر تغییر در یکی، رفتار دیگری را هم تحت تأثیر قرار می‌دهد.

بر عمق شکل‌دهی دارد، در حالی که در سرعت‌های بالا حساسیت فرایند نسبت به فشار کاهش می‌یابد. این موضوع نشان‌دهنده غیرخطی بودن فرایند و لزوم تنظیم هم‌زمان این دو پارامتر است.

۴- افزایش قطر نازل از ۲ به ۲/۷ میلی‌متر منجر به افزایش ملایم عمق شکل‌دهی و یکنواخت‌تر شدن تغییر شکل گردید. نازل بزرگ‌تر با افزایش سطح تماس جت با ورق، توزیع نیرو را بهبود داده و اثر پله‌ای شدن دیواره‌ها را کاهش می‌دهد.

۵- نوع ماده پشتیبان تأثیر قابل‌توجهی بر کیفیت نهایی قطعه دارد. استفاده از سرباره مس به دلیل دانسیته بالاتر و اصطکاک داخلی کمتر، امکان دستیابی به عمق شکل‌دهی بیشتر را فراهم کرده و نازک‌شدگی کف را کاهش داده است. در مقابل، ماسه دریا با افزایش اصطکاک بین ذرات، عمق شکل‌دهی را کاهش داده ولی موجب بهبود تختی دیواره‌ها شده است.

۶- در مجموع، نتایج نشان می‌دهد که فرایند شکل‌دهی تدریجی با واتر جت روشی غیرتماسی، انعطاف‌پذیر و قابل‌کنترل برای شکل‌دهی ورق‌های فولادی زنگ‌نزن است که می‌تواند در کاربردهایی با تیراژ کم و هندسه‌های پیچیده، جایگزین مناسبی برای روش‌های مکانیکی متداول باشد.

۵- منابع

- [1] S. B. M. Echraf and M. Hrairi, "Research and progress in incremental sheet forming processes," *Materials and Manufacturing Processes*, Vol. 26, No. 11, pp. 1404–1414, 2011, DOI: [10.1080/10426914.2010.544817](https://doi.org/10.1080/10426914.2010.544817).
- [2] B. Lu, M. W. Mohamed Bazeer, J. F. Cao, S. Ai, J. Chen, H. Ou, and H. Long, "A study of incremental sheet forming by using water jet," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 91, No. 5–8, pp. 2291–2301, 2017, DOI: [10.1007/s00170-016-9869-5](https://doi.org/10.1007/s00170-016-9869-5).
- [3] J. Jeswiet and J. R. Dufloy, "Formability in single point incremental forming: A comparative analysis of the state of the art," *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, Vol. 7, No. 2, pp. 141–158, 2014, DOI: [10.1016/j.cirpj.2014.03.003](https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2014.03.003).
- [4] M. S. Shim and J. J. Park, "The formability of aluminium sheet in incremental forming," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 113, No.

نسبت به سرباره مس ایجاد شود؛ اما همین اصطکاک و چسبندگی باعث می‌شود سطح دیواره شکل داده شده، تختی بالاتر و شکل ظاهری بهتری داشته باشد. ماسه دریا به دلیل چسبندگی و اصطکاک بالاتر بین ذرات، حرکت محدودتری داشته و اگرچه عمق شکل‌دهی را کاهش می‌دهد، اما موجب بهبود تختی دیواره و کاهش پله‌ای شدن سطح می‌شود.



(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل ۱۳: (الف) آزمایش B1 (ب) آزمایش B2 (ج) آزمایش B5 (د) آزمایش B6

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، فرایند شکل‌دهی تدریجی ورق‌های فولادی زنگ‌نزن AISI 304 با استفاده از جت آب پرفشار به صورت تجربی بررسی شد و اثر پارامترهای اصلی فرایند بر عمق شکل‌دهی و نازک‌شدگی کف قطعه مورد تحلیل قرار گرفت. نتایج به دست آمده را می‌توان به صورت زیر جمع‌بندی کرد:

- ۱- فشار جت آب مؤثرترین پارامتر فرایند شناخته شد؛ به طوری که افزایش فشار از ۷۰ به ۸۰ بار موجب افزایش حدود ۳۷ درصدی عمق شکل‌دهی گردید. این موضوع ناشی از افزایش انرژی جنبشی جت و تمرکز تنش مؤثر در ناحیه تماس با ورق است.
- ۲- سرعت پیشروی نازل اثر معکوس بر عمق شکل‌دهی دارد؛ به گونه‌ای که با افزایش سرعت از ۲/۴ به ۴ mm/min، عمق شکل‌دهی کاهش یافت. کاهش سرعت نازل باعث افزایش زمان تماس جت آب با سطح ورق و در نتیجه افزایش انتقال انرژی و تشدید تغییر شکل پلاستیک می‌شود.
- ۳- برهم‌کنش فشار و سرعت خطی نقش معناداری در رفتار فرایند دارد؛ به طوری که در سرعت‌های پایین، افزایش فشار اثر بسیار بیشتری

Modares Mechanical Engineering, Vol. 20, No. 6, pp. 1635–1645, 2020. (in Persian)

[12] M. Miroir, R. Laniel, A. Brient, and O. Kerbrat, “Water jet incremental sheet metal forming: A critical state-of-the-art review and a proposal for technological windows,” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 119, pp. 4159–4175, 2022, DOI: [10.1007/s00170-021-08635-6](https://doi.org/10.1007/s00170-021-08635-6).

[13] K. He, J. H. Li, Q. Luo, H. Mao, and R. Du, “A study on dieless incremental sheet metal forming using water jet technology,” *Advanced Materials Research*, Vols. 189–193, pp. 795–800, 2011, DOI: [10.4028/www.scientific.net/AMR.189-193.795](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.189-193.795).

[14] S. Wei, L. Xu, K. He, J. Li, W. Feng, and R. Du, “Experimental study on manufacturing metal bellows forming by water jet incremental forming,” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 81, No. 1–4, pp. 129–133, 2015, DOI: [10.1007/s00170-015-7202-3](https://doi.org/10.1007/s00170-015-7202-3).

[15] Y. Shi, W. Zhang, J. Cao, and K. F. Ehmann, “Experimental study of water jet incremental micro-forming with supporting dies,” *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 268, pp. 117–131, 2019, DOI: [10.1016/j.jmatprotec.2019.01.012](https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2019.01.012).

[16] B. Jurisevic, V. Sajin, M. Junkar, and F. Kosel, “Experimental and numerical study of the tool in water jet incremental sheet metal forming,” in *Advances in Integrated Design and Manufacturing in Mechanical Engineering II*, Dordrecht, Netherlands: Springer, pp. 79–91, 2007, DOI: [10.1007/978-1-4020-6761-7_6](https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6761-7_6).

[17] B. Jurisevic, V. Sajin, F. Kosel, and M. Junkar, “Introduction of laminated supporting tools in water jet incremental sheet metal forming,” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 37, No. 5–6, pp. 496–503, 2008, DOI: [10.1007/s00170-007-0994-z](https://doi.org/10.1007/s00170-007-0994-z).

[18] Y. Shi, J. Cao, W. Zhang, and K. F. Ehmann, “Incremental micro-forming of stainless steel foil by high-speed water jet,” in *Proceedings of the International Symposium on Flexible Automation*, pp. 286–293, 2018, DOI: [10.11509/isfa.2018.286](https://doi.org/10.11509/isfa.2018.286).

1–3, pp. 654–658, 2001, DOI: [10.1016/S0924-0136\(01\)00679-3](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(01)00679-3).

[5] R. P. Singh, S. Kumar, E. J. Brambley, S. Choudhary, P. K. Singh, and S. Dhara, “Optimizing formability of incremental sheet forming using the straight groove test assessed with a variable wall angle conical frustum,” *Manufacturing Letters*, Vol. 44, Supplement, pp. 453–465, 2025, DOI: [10.1016/j.mfglet.2025.06.054](https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2025.06.054).

[6] R. P. Singh, S. Kumar, E. Brambley, P. K. Singh, and K. Gangaraju, “A comprehensive experimental investigation of hydraulically supported robot-assisted incremental sheet forming of Al6061 sheets,” *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 148, No. 1, Art. no. 011001, 2026, DOI: [10.1115/1.4070137](https://doi.org/10.1115/1.4070137).

[7] J. Jeswiet, F. Micari, G. Hirt, A. Bramley, J. Duflou, and J. Allwood, “Asymmetric single point incremental forming of sheet metal,” *CIRP Annals*, Vol. 54, No. 2, pp. 88–114, 2005, DOI: [10.1016/S0007-8506\(07\)60021-3](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)60021-3).

[8] Y. H. Kim and J. J. Park, “Effect of process parameters on formability in incremental forming of sheet metal,” *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 130–131, pp. 42–46, 2002, DOI: [10.1016/S0924-0136\(02\)00788-4](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(02)00788-4).

[9] F. Rahmani, S. M. H. Seyedkashi, and S. J. Hashemi, “Converting circular tubes into square cross-sectional parts using incremental forming process,” *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, Vol. 29, No. 11, pp. 2351–2361, 2019, DOI: [10.1016/S1003-6326\(19\)65141-1](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(19)65141-1). (in Persian)

[10] F. Rahmani, S. M. H. Seyedkashi, and S. J. Hashemi, “Experimental study on warm incremental tube forming of AA6063 aluminum tubes,” *International Journal of Engineering*, Vol. 33, No. 9, pp. 1773–1779, 2020, DOI: [10.5829/ije.2020.33.09c.11](https://doi.org/10.5829/ije.2020.33.09c.11). (in Persian)

[11] S. J. Hashemi, F. Rahmani, and S. M. H. Seyedkashi, “Numerical and experimental investigation of forming limit diagram in warm incremental forming process of aluminum tubes,”