



Entropy generation optimization during convective drying of an apple slice

Hosein Majdi Abdollah Abad^{*1}

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

Abstract

Development of high energy efficiency dryers is of great importance for the future of the drying industry. The present research studied entropy production in the process of convective drying of an apple slice with the second law of thermodynamics. The entropy production in fluid flow and moist object is computed and influences of aspect ratio of moist object and inlet temperature and velocity of fluid flow on the entropy production are analyzed. The result show that smaller aspect ratio produces less entropy; also by decreasing inlet temperature and velocity of fluid flow, the entropy production decreases too and by increasing inlet temperature and velocity of fluid flow, moist object will be dried sooner. So respect to the amount of entropy production and final moisture content of the moist object, an optimized value for inlet temperature and velocity of fluid flow will be obtained. The effect of inlet temperature increase on the entropy production is more than inlet velocity increase. The study shows that the second law of thermodynamics is a potential tool for optimizing the drying process and dryers designing.

Keywords

Convective Drying
Second Law of thermodynamics
Optimization
Heat and Mass Transfer
Entropy Production

Received: 30.09.2025

Revised: 04.12.2025

Accepted: 21.02.2026

*Corresponding Author

Hosein Majdi Abdollah Abad

Email

hmajdi@tvu.ac.ir

1- Introduction

Convective drying is widely used in the food industry. Due to the importance of the drying process in industry, extensive research has been conducted on this process. Barati and Esfahani [1] analytically investigated the drying of food materials such as carrots and mangoes using modern methods, albeit with a one-dimensional solution. Esfahani et al. [2] and Majdi et al. [3-5] presented two-dimensional analytical and numerical solutions for the apple drying process in their research. Given that significant energy is consumed in the drying process, optimizing energy consumption in this process appears essential. There are several methods to improve heat transfer in the drying process, including increasing the temperature and flow rate of the inlet air to the dryer and changing the size and geometry of the wet material. However, optimizing the energy consumption of the drying

process is possible using the second law of thermodynamics. According to the second law of thermodynamics, a process with lower entropy generation will have minimal exergy destruction.

The second law of thermodynamics has been applied to investigate processes such as combustion [6,7], evaporation [8], and heat and mass transfer [9-11]. Raghavan et al. [6] performed exergy analysis of fuel combustion for spherical particles and investigated the effect of factors such as fuel injection velocity, temperature, and particle diameter on entropy generation, while Som and Datta [7] analyzed the energy and exergy of solid, liquid, or gaseous fuels. Sun et al. [9] examined entropy generation due to forced convective heat and mass transfer in a two-dimensional channel for laminar and turbulent flow. Furthermore, some

Cite this Article:

[1] H. M. Abdollah Abad, "Entropy generation optimization during convective drying of an apple slice," Science and Technology in Mechanical Engineering, Vol. 5, No. 1, pp. 237–256, 2026. [Online]. Available: <https://doi.org/10.22034/stme.2026.550259.1174> (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

studies on entropy analysis in drying processes can be mentioned [12,13]. Ozgener [12] investigated exergy changes in the drying process in solar greenhouses. Aghbashlo et al. [13] experimentally studied the convective drying process of potatoes and obtained entropy generation using thermodynamic analysis. However, the need for entropy analysis in this field remains. Most research conducted on entropy analysis in drying processes is thermodynamic analysis [14-16]. Vigano [14] examined the role of enthalpy and entropy in drying pineapple powder using different methods and expressed their advantages and disadvantages. Nikbakht et al. [16] analyzed the energy and entropy of pomegranate drying using microwave methods for different air temperatures and velocities. Thermodynamic entropy analysis is also used to optimize the process, but with differential entropy analysis, all details of entropy changes at any moment and any point of the wet material can be examined. This advantage provides a better understanding of the process and enables more effective optimization.

This research attempts to fill the gap for such a solution by presenting a two-dimensional analytical solution. Another objective of this study is the differential analysis of entropy generation in the convective drying process, as past research has not sufficiently addressed differential entropy generation analysis, which seems necessary for understanding entropy variations at each point of the material. Additionally, various parameters affecting the drying process have been investigated. Typically, the inlet air humidity and the final moisture content of the wet material are constant, and to improve the process, the temperature and velocity of the inlet air and the size of the wet material can be varied. In this study, entropy generation was first calculated for three cases where the wet material with three different aspect ratios was placed in the dryer. Subsequently, for the case with the lowest entropy generation, process optimization was performed considering minimum entropy generation and acceptable final moisture content for different flow temperatures and velocities.

2- Research Methods

2-1 Modeling of External Temperature and Flow

The material used in this modeling is apple slices. Figure 1 shows the external domain of the problem and its boundary conditions. In this case, the length and width of the wet material are considered 8 cm and 2 cm, respectively. At the flow inlet on the left side of the domain, the inlet air temperature and velocity are $T_\infty=323$ K and $U_\infty=0.33$ m/s, respectively, and the walls are assumed adiabatic. Due to the very slight difference in heat and mass transfer coefficients at the top and bottom of the wet material, the material is considered symmetric about the line $y = 0.01$ m. The governing equations for forced air convection are the conservation equations of mass, momentum, and energy.

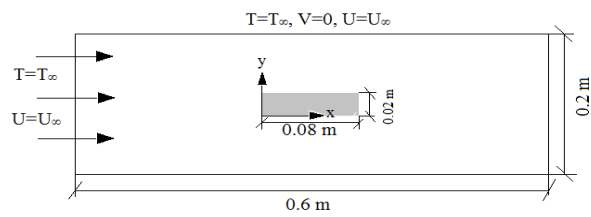


Figure 1: External domain of the problem along with flow

2-2 Modeling of Temperature and Moisture Distribution within the Wet Material

To simulate the drying process, an unsteady two-dimensional analytical model was used. To obtain the temperature and moisture fields inside the material, an analytical solution was presented with the following assumptions:

1. The moisture content of the material does not affect its thermo-physical properties except for the moisture diffusion coefficient.
2. Shrinkage and deformation of the wet material are neglected.

2-3 Modeling of Entropy Generation

Initially, entropy generation in the wet material with an aspect ratio (width to length ratio of the wet material) of $ar = 1/4$ was investigated. After examining the wet material with $ar = 1/4$, by changing the size of the wet material and the temperature and velocity of the inlet air flow, entropy generation was calculated for other cases,

and after comparison, the optimal conditions were selected. The specifications of the wet material and the flow are given in Table 1.

Table 1: Specifications of the wet material and flow [17]

Thermal conductivity, k	0.576 W/(m K)
Density, ρ	856 Kg/m ³
Specific heat at constant pressure, C_p	1929 J/(Kg K)
Moisture diffusion coefficient, D	6.62×10^{-8} m ² /s
Initial moisture content, M_0	7.196 kg/kg of dry air
Initial temperature, T_0	298 K
Inlet air humidity, M_∞	7.196 kg/kg of dry air
Inlet air viscosity, μ	1.96×10^{-9} N.s/m ²

3- Solution Method

The governing equations for the external flow were solved numerically based on the control volume method using the SIMPLE algorithm with the Fluent software.

After characterizing the external flow and obtaining the temperature distribution around the material, the convective heat transfer coefficients can be obtained using the heat balance equation between conduction and convection at the surface of the apple slice. Then, using the Chilton-Colburn analogy, the local mass transfer coefficients are obtained

4- Results and Discussion

Because the flow walls are at the same temperature as the inlet air, thermal entropy generation is zero over a large part of the flow; however, due to the temperature difference between the flow and the wet material around the material, significant entropy generation occurs, and its effects are also observed in the flow passing over the material behind it. The air at the front surface of the material

has the highest entropy generation because, according to the temperature distribution of the wet material, the highest convective heat transfer coefficient corresponds to the front surface, resulting in greater heat transfer from this surface.

Due to the laminar nature of the flow, frictional entropy generation in the entire flow is very negligible. Slight disturbances caused by the flow passing over the front corners of the material generate a small amount of entropy in these regions. However, due to the laminar flow and low viscosity of air, frictional entropy generation is negligible and can be disregarded compared to thermal entropy generation. The pattern of total entropy generation of the flow is similar to that of thermal entropy generation.

In the initial moments, intense entropy generation occurs on the front surface of the material, which is due to the high heat transfer coefficient on this surface. At later times, the entropy generation contours gradually form. Similar to the temperature distribution, entropy generation has elliptical contours because entropy generation is higher on the surfaces of the material where heat transfer is greater, and due to the higher convective heat transfer coefficient on the front surface, entropy generation is higher there, causing the entropy generation contours to stretch towards the rear surface of the material.

Entropy generation contours due to mass transfer, similar to those due to heat transfer, are intense on the front surface in the initial moments, and gradually these contours become elliptical. This is because, as before, the mass transfer coefficient on the front surface is higher than on other surfaces. The difference between entropy generation due to mass transfer and that due to heat transfer is that, firstly, the values of entropy generation due to mass transfer are lower than those due to heat transfer, and secondly, the entropy generation contours due to mass transfer take a longer time to become elliptical compared to those due to heat transfer. The reason for this phenomenon is that mass transfer is slower than heat transfer.

Thermal entropy generation has larger values in the initial times compared to other entropy generation mechanisms, but due to the temperature equilibration between the material and the flow, its value decreases rapidly. However, entropy generation due to mass transfer continues for much longer periods. Both entropy generation processes initially reach a maximum value and then decrease. Initially, when temperature and moisture changes are severe, the numerator terms in the relevant equations dominate, and entropy generation follows an increasing path. However, after some time, when the intensity of temperature and moisture changes decreases, the temperature and moisture values themselves become dominant, and entropy generation decreases. Since temperature appears squared in the denominator of thermal entropy generation, thermal entropy generation decreases with a steep slope. In contrast, for entropy generation due to mass transfer, moisture appears to the first power in the denominator, so entropy generation decreases with a gentle slope.

5- Conclusion

In this study, after the two-dimensional analytical solution of temperature and moisture distribution within the wet material, entropy generation in the convective drying process of an apple slice was investigated differentially. The role of influential factors on entropy generation, such as the aspect ratio of the wet material and the inlet air temperature and velocity, was analyzed. The most important results are:

- As the aspect ratio of the wet material decreases, entropy generation also decreases. Increasing the inlet air temperature and velocity increases entropy generation but reduces the final moisture content of the material, resulting in a drier product.
- Considering the final moisture content of the wet material and the entropy generation, an optimal value for the inlet air temperature and velocity can be obtained.

- Increasing the air flow temperature has a greater effect on entropy generation than increasing the flow velocity.
- In the differential entropy analysis of the drying process, the influence of all points in the solution domain was clearly observed, and it was determined that the wet material has significantly higher entropy generation compared to the air flow and plays a more important role in process optimization.

6- References

- [1] E. Barati and J. A. Esfahani, "A novel approach to evaluate the temperature during drying of food products with negligible external resistance to mass transfer," *Journal of Food Engineering*, Vol. 114, No. 1, pp. 39-46, 2013, DOI: [10.1016/j.jfoodeng.2012.07.028](https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2012.07.028). (in Persian)
- [2] J. A. Esfahani, H. Majdi, and E. Barati, "Analytical two-dimensional analysis of the transport phenomena occurring during convective drying: Apple slices," *Journal of Food Engineering*, Vol. 123, pp. 87-93, 2014, DOI: [10.1016/j.jfoodeng.2013.09.019](https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2013.09.019). (in Persian)
- [3] H. Majdi and J. A. Esfahani, "Energy and drying time optimization of convective drying: Taguchi and LBM methods," *Drying Technology*, Vol. 37, No. 6, pp. 722-734, 2019, DOI: [10.1080/07373937.2018.1458036](https://doi.org/10.1080/07373937.2018.1458036). (in Persian)
- [4] H. Majdi and J. A. Esfahani, "Energy consumption and drying time optimization of convective drying for performance improvement: Response surface methodology and lattice Boltzmann method," *Journal of Heat Transfer*, Vol. 140, No. 10, Art. no. 102009, 2018, DOI: [10.1115/1.4040259](https://doi.org/10.1115/1.4040259). (in Persian)
- [5] H. Majdi, J. A. Esfahani, and M. Mohebbi, "Optimization of convective drying by response surface methodology," *Computers and Electronics in Agriculture*, Vol. 156, pp. 574-584, 2019, DOI: [10.1016/j.compag.2018.12.021](https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.12.021). (in Persian)
- [6] M. Boghrati, "Entropy generation minimization of confined nanofluids laminar flow around a block," *Science and Technology in Mechanical*

Engineering, Vol. 2, No. 1, pp. 77-85, 2023, DOI: [10.22034/stme.2023.410125.1043](https://doi.org/10.22034/stme.2023.410125.1043). (in Persian)

[7] S. K. Som and A. Datta, "Thermodynamic irreversibilities and exergy balance in combustion processes," *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 34, No. 3, pp. 351-376, 2008, DOI: [10.1016/j.pecs.2007.09.001](https://doi.org/10.1016/j.pecs.2007.09.001).

[8] I. Janghorban Esfahani, S. C. Lee, and C. K. Yoo, "Evaluation and optimization of a multi-effect evaporation-absorption heat pump desalination based conventional and advanced exergy and exergoeconomic analyses," *Desalination*, Vol. 359, pp. 92-107, 2015, DOI: [10.1016/j.desal.2014.12.030](https://doi.org/10.1016/j.desal.2014.12.030). (in Persian)

[9] J. Y. San, W. M. Worek, and Z. Lavan, "Entropy generation in combined heat and mass transfer," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 30, No. 7, pp. 1359-1369, 1987, DOI: [10.1016/0017-9310\(87\)90168-2](https://doi.org/10.1016/0017-9310(87)90168-2).

[10] J. Herpe, D. Bougeard, S. Russeil, and M. Stanciu, "Numerical investigation of local entropy production rate of a finned oval tube with vortex generators," *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 48, No. 5, pp. 922-935, 2009, DOI: [10.1016/j.ijthermalsci.2008.07.006](https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2008.07.006).

[11] A. Hosseinpour, A. Akhoundzadeh Yamchi, M. Feyzollahzadeh, A. Moradians, and F. Khayatinejad, "Thermodynamic analysis, heat transfer, and modeling of infrared drying of nettle," *Quarterly Journal of Agricultural Machinery Mechanics Research*, Vol. 13, No. 2, 2024. (in Persian)

[12] S. Keramat Bacheh Jaki, F. Sharifian, and A. Naghali, "Analysis of mass and heat transfer of willow leaves during drying with ultrasonic pretreatment in an infrared dryer," in *Proceedings*

of the 15th National Congress and 1st International Congress of Biosystems Mechanical Engineering and Agricultural Mechanization, 2023. (in Persian)

[13] M. Aghbashlo, M. H. Kianmehr, and A. Arabhosseini, "Energy and exergy analyses of thin-layer drying of potato slices in a semi-industrial continuous band dryer," *Drying Technology*, Vol. 26, No. 12, pp. 1501-1508, 2008, DOI: [10.1080/07373930802412231](https://doi.org/10.1080/07373930802412231). (in Persian)

[14] J. Viganó, E. Azuara, V. R. N. Telis, C. I. Beristain, M. Jiménez, and J. Telis-Romero, "Role of enthalpy and entropy in moisture sorption behavior of pineapple pulp powder produced by different drying methods," *Thermochimica Acta*, Vol. 528, pp. 63-71, 2012, DOI: [10.1016/j.tca.2011.11.011](https://doi.org/10.1016/j.tca.2011.11.011).

[15] T. Ramirez, Y. Meas, and K. Gottschalk, "Energy interaction of sub-processes in drying value chain using exergy waste: Study case: Drying and greenhouse growing of tomato," *Energy Procedia*, Vol. 57, pp. 1437-1446, 2014, DOI: [10.1016/j.egypro.2014.10.135](https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.10.135).

[16] A. M. Nikbakht, A. Motevali, and S. Minaei, "Energy and exergy investigation of microwave assisted thin-layer drying of pomegranate arils using artificial neural networks and response surface methodology," *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, Vol. 13, No. 2, pp. 81-91, 2014, DOI: [10.1016/j.jssas.2013.01.005](https://doi.org/10.1016/j.jssas.2013.01.005). (in Persian)

[17] A. Kaya, O. Aydin, and I. Dincer, "Numerical modeling of heat and mass transfer during forced convection drying of rectangular moist objects," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 49, No. 17-18, pp. 3094-3103, 2006, DOI: [10.1016/j.ijheatmasstransfer.2006.01.043](https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2006.01.043)



حل تحلیلی دوبعدی انتقال حرارت و جرم و بررسی تولید آنتروپی در فرایند خشک شدن

یک تکه میوه به شیوهی همرفت

حسین مجدی عبدالله آباد*  ID

۱- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه ملی مهارت، تهران، ایران

چکیده

افزایش بازده انرژی خشک‌کن‌ها نقش مهمی در توسعه‌ی صنعت خشک کردن دارد. بدین جهت در این تحقیق، پس از حل تحلیلی دوبعدی توزیع دما و رطوبت در جسم مرطوب، تولید آنتروپی در فرایند خشک کردن به شیوهی همرفت به کمک قانون دوم ترمودینامیک بررسی شده است. تولید آنتروپی برای جریان هوا و جسم مرطوب در حال خشک شدن محاسبه گردیده و نقش عواملی هم‌چون نسبت ظاهری جسم مرطوب و دما و سرعت جریان هوای ورودی در تولید آنتروپی تحلیل شده است. نتایج نشان می‌دهد که نسبت ظاهری کوچک‌تر (نسبت ظاهری ۴-۱) تولید آنتروپی کمتری دارد. هرچه اختلاف دمای هوای ورودی و دمای جسم مرطوب کم‌تر شود و سرعت جریان ورودی کاهش یابد، تولید آنتروپی نیز کم می‌شود و با بیشتر شدن دما و سرعت جریان، محصول خشک‌شده‌تری به دست می‌آید؛ اما با توجه به میزان رطوبت نهایی جسم مرطوب و تولید آنتروپی، یک مقدار بهینه برای دما ($T_w = 330.7\text{ K}$) و سرعت جریان هوای ورودی ($U_w = 0.321\text{ m/s}$) در نظر گرفته می‌شود. افزایش دمای جریان هوا در برابر افزایش سرعت جریان هوا، افزایش تولید آنتروپی بسیار بیشتری را نشان می‌دهد. همچنین مشخص می‌شود که جسم مرطوب سهم بیشتری در تولید آنتروپی دارد. ۸۹٪ آنتروپی در جسم مرطوب و ۱۱٪ درصد دیگر در جریان تولید می‌شود. همچنین در کل سیستم ۶۹٪ تولید آنتروپی حرارتی است و ۳۹٪ دیگر تولید آنتروپی ناشی از انتقال جرم می‌باشد.

کلمات کلیدی

خشک شدن به شیوهی همرفت
قانون دوم ترمودینامیک
بهینه‌سازی
انتقال حرارت و انتقال جرم
تولید آنتروپی

دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۰۷/۰۸

بازنگری مقاله: ۱۴۰۴/۰۹/۱۳

پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۱۲/۰۲

*نویسنده مسئول

حسین مجدی عبدالله آباد

ایمیل

hmajdi@tvu.ac.ir

۱- مقدمه

در فرایندهای مختلف صنعتی، همواره نیاز به بهینه‌سازی از جهات مختلف وجود دارد. امروزه یکی از مهم‌ترین نیاز صنایع، بهینه‌سازی انرژی می‌باشد. بهینه‌سازی نیز با روش‌های مختلفی از جمله کاهش تولید آنتروپی انجام می‌شود. خشک کردن به شیوهی همرفت نیز یکی از صنایعی می‌باشد که به‌طور گسترده‌ای در صنایع مواد غذایی استفاده می‌شود و بهینه‌سازی مصرف انرژی در آن ضروری به نظر می‌رسد. به دلیل اهمیت فرایند خشک کردن در صنعت، تحقیقات زیادی بر روی این فرایند انجام شده است. براتی و اصفهانی [۱] خشک کردن مواد غذایی مانند هویج و انبه را به‌صورت تحلیلی با روش‌های نوین اما با حل یک‌بعدی بررسی کرده‌اند. اصفهانی و همکاران [۲] و مجدی و همکاران [۳-۵] در تحقیقات خود حل دوبعدی تحلیلی و عددی در

فرایند خشک کردن سیب ارائه نموده‌اند. با توجه به این‌که در فرایند خشک کردن انرژی زیادی مصرف می‌شود، بهینه کردن مصرف انرژی در این فرایند ضروری به نظر می‌رسد. روش‌های متعددی برای بهبود انتقال حرارت در فرایند خشک شدن وجود دارد؛ از این جمله می‌توان به افزایش دما و دبی هوای ورودی به خشک‌کن و تغییر اندازه و هندسه ی جسم مرطوب اشاره کرد؛ اما بهینه کردن انرژی مصرفی فرایند خشک کردن با استفاده از قانون دوم ترمودینامیک امکان‌پذیر است. بر اساس قانون دوم ترمودینامیک، فرایندی که تولید آنتروپی کمتری داشته باشد، کمترین هدر دهی انرژی را خواهد داشت. قانون دوم ترمودینامیک تاکنون در بررسی فرایندهایی مانند خنک کاری [۶]، احتراق [۷]، خنک کاری [۸] و انتقال جرم و حرارت

Cite this Article:

[1] H. M. Abdollah Abad, "Entropy generation optimization during convective drying of an apple slice," Science and Technology in Mechanical Engineering, Vol. 5, No. 1, pp. 237-256, 2026. [Online]. Available: <https://doi.org/10.22034/stme.2026.550259.1174> (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/>)

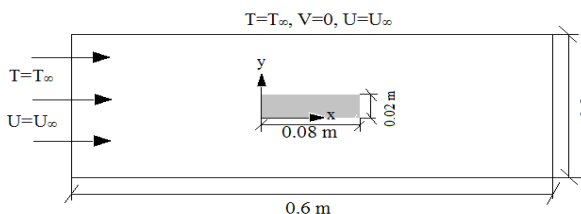
شاپای الکترونیک: ۲۲۳۲-۲۹۸۱

بهبود فرایند می‌توان دما و سرعت هوای ورودی و اندازه جسم مرطوب را تغییر داد. در این تحقیق ابتدا تولید آنتروپی برای سه مورد انجام شده است که در آن جسم مرطوب با سه نسبت ظاهری مختلف بررسی شده است و پس از آن برای موردی که کمترین تولید آنتروپی را دارد، بهینه‌سازی فرایند با توجه به کمترین تولید آنتروپی و رطوبت نهایی قابل قبول برای دما و سرعت‌های مختلف جریان انجام می‌شود.

۲- مدل‌سازی

۲-۱- مدل‌سازی دما و جریان خارجی

جسم استفاده شده در این مدل‌سازی، سیب می‌باشد. شکل ۱ حوزه خارجی مسئله و شرایط مرزی آن را نشان می‌دهد. در این مورد طول و عرض جسم مرطوب به ترتیب ۸ و ۲ سانتی‌متر در نظر گرفته شده است. در ورودی جریان در سمت چپ حوزه، دما و سرعت جریان هوای ورودی و دیواره‌ها به ترتیب T_∞ ، ۳۲۳ کلوین و U_∞ ، ۰/۳۳ متر بر ثانیه می‌باشد. با توجه به تفاوت بسیار ناچیز مقادیر ضرایب انتقال حرارت و جرم در بالا و پایین جسم مرطوب، جسم نسبت به خط y در یک سانتی‌متر، متقارن در نظر گرفته شده است. معادلات حاکم بر جابجایی اجباری هوا، معادلات بقای جرم، اندازه حرکت و انرژی می‌باشند. معادلات دوبعدی حاکم بر مسئله با فرض خواص فیزیکی و حرارتی ثابت و جریان غیر قابل تراکم بدین صورت می‌باشند:



شکل ۱: حوزه خارجی مسئله به همراه شرایط مرزی جریان

معادله‌ی بقای جرم عبارت است از [۱۷]:

$$\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

معادلات بقای اندازه حرکت عبارت‌اند از [۱۷]:

$$\rho \left(U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} \right) \quad (2)$$

$$\rho \left(U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} \right) \quad (3)$$

معادله‌ی بقای انرژی عبارت است از [۱۷]:

[۹ و ۱۰] استفاده شده است. بقراطی [۶] فرایند خنک کردن و گرم کردن یک جسم جامد در یک جریان را بررسی کرده و تأثیر نانو سیال‌ها بر کمینه کردن تولید آنتروپی را محاسبه نموده است، درحالی‌که سام و داتا [۷] تأثیر جامد، مایع و یا گاز بودن سوخت را تحلیل انرژی و اگزرژی کرده‌اند. سان و همکاران [۹] تولید آنتروپی انتقال حرارت و جرم همرفت اجباری در یک کانال دوبعدی را برای جریان آرام و آشفته بررسی کرده‌اند. همچنین می‌توان به برخی از کارهای انجام شده بر تحلیل آنتروپی در فرایند خشک کردن اشاره کرد [۱۱-۱۳]. حسین-پور و همکاران [۱۱] تجزیه و تحلیل ترمودینامیکی، انتقال حرارت و مدل‌سازی خشک کردن گزنه با مادون قرمز را بررسی کرده و عوامل افزایش آنتروپی را معرفی نموده‌اند. کرامت و همکاران [۱۲] با انجام آنالیز انتقال جرم و حرارت برگ بید، طی خشک کردن با پیش تیمار فراصوت در خشک‌کن مادون قرمز، توانستند کمیت‌های آنتالپی و آنتروپی و انرژی آزاد گیبس را تحلیل نمایند. آقباشلو و همکاران [۱۳] فرایند خشک کردن به شیوه‌ی همرفت در سیب‌زمینی را به‌صورت آزمایشگاهی بررسی کرده و تولید آنتروپی را با استفاده از تحلیل ترمودینامیکی به دست آورده‌اند. اما همچنان نیاز به تحلیل آنتروپی در این زمینه احساس می‌شود. بیشتر تحقیقات انجام شده در زمینه‌ی تحلیل آنتروپی در فرایند خشک کردن، تحلیل ترمودینامیکی [۱۴-۱۶] می‌باشد. ویگانو [۱۴] نقش آنتالپی و آنتروپی در خشک کردن پودر آناناس به روش‌های مختلف را بررسی کرده و مزایا و معایب آن‌ها را بیان نموده‌اند. نیکبخت و همکاران [۱۶] انرژی و آنتروپی خشک کردن انار به شیوه‌ی مایکروویو را برای دماها و سرعت‌های هوای متفاوت تحلیل کرده‌اند. از تحلیل ترمودینامیکی آنتروپی نیز برای بهینه کردن فرایند استفاده می‌شود، اما به کمک تحلیل دیفرانسیلی آنتروپی، تمام جزئیات تغییر آنتروپی در هر لحظه و هر نقطه از جسم مرطوب قابل بررسی است که این مزیت موجب می‌شود تا درک بهتری از فرایند داشت و امکان بهینه‌سازی مؤثرتر را فراهم می‌کند.

در این تحقیق تلاش شده با ارائه‌ی یک حل تحلیلی دوبعدی، جای خالی این نوع حل پر شود و همچنین هدف دیگر انجام این تحقیق، تحلیل دیفرانسیلی آنتروپی فرایند خشک کردن به‌صورت همرفت می‌باشد، زیرا با توجه به عدم توجه کافی تحقیقات گذشته به تحلیل دیفرانسیلی تولید آنتروپی، برای درک تغییرات آنتروپی در هر نقطه از جسم، این امر ضروری به نظر می‌رسد. همچنین پارامترهای مختلف تأثیرگذار بر فرایند خشک کردن بررسی شده‌اند. به‌طور معمول رطوبت هوای ورودی و رطوبت نهایی جسم مرطوب ثابت می‌باشند و برای

$$\frac{\partial T(x, 0, t)}{\partial y} = 0 \quad (۱۳)$$

$$\frac{\partial M(x, 0, t)}{\partial y} = 0 \quad (۱۴)$$

شرایط مرزی بالا:

$$-k \frac{\partial T(x, H, t)}{\partial y} = h(T - T_{\infty}) \quad (۱۵)$$

$$-D \frac{\partial M(x, H, t)}{\partial y} = h_m(M - M_{\infty}) \quad (۱۶)$$

که D ضریب نفوذ رطوبت می باشد و از رابطه ی آرنیوس [۱۷] محاسبه می شود:

$$D = D_0 \exp\left(\frac{-1119}{T}\right) \quad (۱۷)$$

۳-۲- مدل سازی تولید آنتروپی

ابتدا تولید آنتروپی در جسم مرطوب با نسبت ظاهری (نسبت عرض به طول جسم مرطوب) $ar=1-4$ بررسی شده است. پس از بررسی جسم مرطوب با نسبت ظاهری $ar=1-4$ ، با تغییر اندازه ی جسم مرطوب و دما و سرعت جریان هوای ورودی، تولید آنتروپی برای موارد دیگر انجام شده و پس از مقایسه، شرایط بهینه انتخاب شده است. مشخصات جسم مرطوب و جریان در جدول ۱ آمده است.

بر اساس پارامترهای تعریف شده و حل جریان و جسم مرطوب، تولید آنتروپی در مختصات کارترین به این صورت به دست می آید [۱۰]:

$$S_h = \frac{k}{T^2} \left[\left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)^2 \right] \quad (۱۸)$$

$$S_f = \frac{\mu}{T} \left\{ 2 \left[\left(\frac{\partial U}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial y} \right)^2 \right] + \left[\left(\frac{\partial U}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial x} \right)^2 \right] \right\} \quad (۱۹)$$

$$S_m = \rho \times R \left(\frac{D}{X} \right) \times \left[\left(\frac{\partial X}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial X}{\partial y} \right)^2 \right] \quad (۲۰)$$

که در آن S_h تولید آنتروپی ناشی از حرارت، S_f تولید آنتروپی ناشی از اصطکاک در جریان سیال و S_m تولید آنتروپی ناشی از انتقال

$$U \frac{\partial T}{\partial x} + V \frac{\partial T}{\partial y} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (۴)$$

۲-۲- مدل سازی توزیع دما و رطوبت درون جسم مرطوب

برای شبیه سازی فرایند خشک کردن، یک مدل تحلیلی ناپایای دوبعدی استفاده شده است. برای به دست آوردن میدان دما و رطوبت درون جسم یک حل تحلیلی با فرض های زیر ارائه شده است:

۱. میزان رطوبت جسم به خواص فیزیکی- حرارتی آن به جز

ضریب نفوذ رطوبت وابسته نیست.

۲. از انقباض و تغییر شکل جسم مرطوب صرف نظر شده است.

معادلات دوبعدی انتقال حرارت و جرم حاکم بر فرایند خشک کردن در جسم مرطوب با شرایط ذکر شده، به این صورت می باشند [۱۷]:

$$\frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \quad (۵)$$

$$\frac{1}{D} \frac{\partial M}{\partial t} = \frac{\partial^2 M}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 M}{\partial y^2} \quad (۶)$$

شرایط اولیه و مرزی جسم مرطوب عبارت اند از:

شرایط اولیه:

$$T(x, y, 0) = T_0 \quad (۷)$$

$$M(x, y, 0) = M_0 \quad (۸)$$

شرایط مرزی چپ:

$$k \frac{\partial T(0, y, t)}{\partial x} = h(T - T_{\infty}) \quad (۹)$$

$$D \frac{\partial M(0, y, t)}{\partial x} = h_m(M - M_{\infty}) \quad (۱۰)$$

شرایط مرزی راست:

$$-k \frac{\partial T(L, y, t)}{\partial x} = h(T - T_{\infty}) \quad (۱۱)$$

$$-D \frac{\partial M(L, y, t)}{\partial x} = h_m(M - M_{\infty}) \quad (۱۲)$$

شرایط مرزی پایین (تقارن):

۳- روش حل

معادلات حاکم بر جریان خارجی به صورت عددی و بر مبنای روش حجم کنترل و به کمک الگوریتم سیمپل و توسط نرم افزار فلوئنت حل شده است.

پس از مشخص کردن جریان خارجی و به دست آوردن توزیع دمای اطراف جسم، ضرایب انتقال حرارت همرفت را می توان به کمک رابطه ی تعادل انتقال حرارت رسانش و همرفت در سطح تکه سیب به دست آورد.

$$-k \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_s = h(T_s - T_{\infty}) \quad (25)$$

سپس با استفاده از تشابه چیلتون-کولبرن (رابطه ی ۲۶)، ضرایب انتقال جرم محلی به دست می آیند.

$$h_m = h \left(\frac{D \text{Le}^n}{k} \right) \quad (26)$$

که k و $\text{Le} = \alpha/D$ به ترتیب ضریب رسانش حرارتی سیال و عدد لوئیس می باشند. در اکثر کاربردها، $n=1/3$ [۱۸] یک فرض منطقی می باشد. ضرایب انتقال حرارت و جرم همرفت میانگین روی هر سطح به دست می آید. حل تحلیلی دوبعدی انتقال حرارت و جرم توسط روش تفکیک متغیرها به صورت حاصل ضرب دو حل یک بعدی انجام شده است. دما و میزان رطوبت بی بعد بدین روش نوشته می شوند.

$$\theta(x, y, t) = \frac{T(x, y, t) - T_0}{T_{\infty} - T_0} \quad (27)$$

$$\varphi(x, y, t) = \frac{M(x, y, t) - M_{\infty}}{M_0 - M_{\infty}} \quad (28)$$

با توجه به معادلات انتقال حرارت و شرایط مرزی آن می توان توزیع دمای جسم مرطوب را بدون به دست آوردن توزیع رطوبت مشخص کرد.

حل دقیق دمای بی بعد در رابطه ی (۲۹) دیده می شود.

جرم می باشد. T دما، U سرعت در راستای x ، V سرعت در راستای y ، X میزان رطوبت جسم مرطوب، μ لزجت سیال، ρ چگالی جسم مرطوب، R ثابت جهانی گازها برای بخار آب و D ضریب نفوذ رطوبت می باشد.

جدول ۱: مشخصات جسم مرطوب و جریان [۱۷]

خواص و شرایط	
ضریب هدایت گرمایی، k	۰/۵۷۶ W/(m k)
چگالی، ρ	۸۵۶ Kg/m ³
گرمای ویژه در فشار ثابت، C_p	۱۹۲۹ J/(Kg K)
ضریب نفوذ رطوبت، D	۶/۶۲ × ۱۰ ^{-۸} m ² /s
میزان رطوبت اولیه، M_0	kg/kg of dry air ۷/۱۹۶
دمای اولیه، T_0	۲۹۸ K
میزان رطوبت هوای ورودی، M_{∞}	kg/kg of dry air ۰/۱۹۶
لزجت هوای ورودی، μ	۱/۹۶ × ۱۰ ^{-۴} N.s/m ²

تولید آنتروپی جسم مرطوب شامل تولید آنتروپی بر اثر انتقال حرارت و جرم می باشد:

$$S_s = S_{h,s} + S_{m,s} \quad (21)$$

و به دلیل ناچیز بودن رطوبت در جریان [۱۷]، تولید آنتروپی جریان نیز شامل تولید آنتروپی اصطکاک جریان سیال و انتقال حرارت است:

$$S_g = S_{f,g} + S_{h,g} \quad (22)$$

تولید آنتروپی کل حوزه با انتگرال گیری از تولید آنتروپی محلی روی حجم سیستم به دست می آید:

$$\dot{S}_{tot} = \int_{V_g} S_g dV + \int_{V_s} S_s dV \quad (23)$$

عدد Be نیز که نشان دهنده ی میزان تأثیر بازگشت ناپذیری به دلیل انتقال حرارت بر تولید آنتروپی در جریان سیال می باشد، طبق تعریف زیر به دست می آید:

$$Be = \frac{S_{h,g}}{S_g} \quad (24)$$

$$\varphi(x, y, 0) = 1 \quad (۳۵)$$

$$\frac{\partial \varphi(0, y, t)}{\partial x} = h_m(a\varphi + b(t)\varphi) \quad (۳۶)$$

$$-\frac{\partial \varphi(L, y, t)}{\partial x} = h_m(a\varphi + b(t)\varphi) \quad (۳۷)$$

$$\frac{\partial \varphi(x, 0, t)}{\partial y} = 0 \quad (۳۸)$$

$$-\frac{\partial \varphi(x, H, t)}{\partial y} = h_m(a\varphi + b(t)\varphi) \quad (۳۹)$$

باید یادآور شد که بر اساس تئوری دوهمال^۵، مسائل وابسته به زمان را می‌توان به گام‌های زمانی کوچک‌تر کاهش داد [۱۹]. این روش برای رطوبت سطح جسم کاربردی می‌باشد اما شرایط مرزی این مسئله (روابط ۳۶، ۳۷ و ۳۹) به دلیل غیرخطی بودن، از مسئله دوهمال روتین پیچیده‌تر است. با در نظر گرفتن $\varphi' = \varphi + \frac{b(t)}{a}\varphi = \varphi + b'\varphi$ و $a' = h_m a$ و با فرض ثابت بودن a' و b' ، معادلات ۳۴ تا ۳۹ به این شکل نوشته می‌شود.

$$\frac{1}{D(t)} \frac{\partial \varphi'}{\partial t} = \frac{\partial^2 \varphi'}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi'}{\partial y^2} \quad (۴۰)$$

$$\varphi'(x, y, 0) = 1 + b' \quad (۴۱)$$

$$\frac{\partial \varphi'(0, y, t)}{\partial x} = a'\varphi' \quad (۴۲)$$

$$-\frac{\partial \varphi'(L, y, t)}{\partial x} = a'\varphi' \quad (۴۳)$$

$$\frac{\partial \varphi'(x, 0, t)}{\partial y} = 0 \quad (۴۴)$$

$$-\frac{\partial \varphi'(x, H, t)}{\partial y} = a'\varphi' \quad (۴۵)$$

اکنون معادله‌ی انتقال جرم و شرایط مرزی آن، همگن شده و حل دقیق رطوبت بی بعد توسط روش تفکیک متغیرها به دست می‌آید.

$$\begin{aligned} \theta(x, y, t) &= 1 \\ &- \left\{ \sum_{n=0}^{\infty} A_n \left[\frac{h_1}{k\lambda_n} \sin(\lambda_n x) \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + \cos(\lambda_n x) \right] e^{-\alpha(\lambda_n^2)t} \right\} \\ &\times \left\{ \sum_{m=0}^{\infty} A_m \cos(\beta_m y) e^{-\alpha(\beta_m^2)t} \right\} \end{aligned} \quad (۲۹)$$

که λ و β به ترتیب مقادیر مشخصه^۱ در راستای x و y می‌باشند که از معادلات ۳۰ و ۳۱ به دست می‌آیند.

$$\cot(\lambda_n L) = \frac{k\lambda_n - \frac{h_1 h_3}{k\lambda_n}}{h_1 + h_3} \quad (۳۰)$$

$$\tan(\beta_m H) = \frac{h_2}{k\beta_m} \quad (۳۱)$$

در معادلات ۳۲ و ۳۳، ضرایب ثابت A_n و A_m توسط خاصیت متعامد بودن^۲ محاسبه می‌شوند.

$$A_n = \frac{\int_0^L \left[\frac{h_1}{k\lambda_n} \sin(\lambda_n x) + \cos(\lambda_n x) \right] dx}{\int_0^L \left[\frac{h_1}{k\lambda_n} \sin(\lambda_n x) + \cos(\lambda_n x) \right]^2 dx} \quad (۳۲)$$

$$A_m = \frac{\sin(\beta_m H)}{\left[\frac{\beta_m H}{2} + \frac{\sin(2\beta_m H)}{4} \right]} \quad (۳۳)$$

انتگرال‌های رابطه‌ی ۳۲ با نرم‌افزار میپل^۳ محاسبه شده‌اند.

پس از به دست آوردن توزیع دما در طول زمان $(T(t))$ ، ضریب نفوذ رطوبت $(D(t))$ قابل محاسبه می‌باشد. $(D(t))$ با استفاده از رابطه-ی (۱۷) و با روش برازش منحنی^۴ به صورت یک چند جمله‌ای به دست می‌آید. با استفاده از معادله‌ی (۲۸) و جدا کردن $(D(t))$ به دو بخش ثابت و وابسته به زمان، معادله‌ی انتقال جرم و شرایط مرزی آن به این صورت بازنویسی می‌شوند.

$$\frac{1}{D(t)} \frac{\partial \varphi}{\partial t} = \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} \quad (۳۴)$$

^۴ Curve Fitting

^۵ Duhamel

^۱ Eigenvalue

^۲ Orthogonality

^۳ Maple

روش حل به صورت خلاصه در ۵ مرحله نشان داده شده است.

مرحله ۱: مشخص کردن مقادیر اولیه دما و میزان رطوبت، بازه زمانی، خواص جسم مرطوب و شرایط فیزیکی.

مرحله ۲: محاسبه دمای بی بعد جسم از معادله ۲۹.

مرحله ۳: محاسبه $D(t)$ ، a' ، b' و $t_{new} = t_{old} + \Delta t$

مرحله ۴: محاسبه میزان رطوبت بی بعد از رابطه ۴۸.

مرحله ۵: به دست آوردن T و M از θ و φ .

حال با استفاده از روابط دما و رطوبت جسم مرطوب می توان به کمک روابط (۱۸) تا (۲۴)، تولید آنتروپی را به دست آورد.

۴- بررسی نتایج

نتایج تحلیل جریان خارجی و انتقال حرارت و جرم درون تکه سیب در این بخش نمایش داده می شود. کانتورهای جریان و دما حول جسم مرطوب در $U_{\infty} = 0.33 \frac{m}{s}$ در شکل ۲ و شکل ۳ آمده است. همان طور که در شکل ۲ دیده می شود در پشت جسم جدایش رخ داده و موجب تماس کمتر هوا با این سطح می شود. هم چنین کانتورهای دما در شکل ۳ این موضوع را تأیید می کند زیرا دمای سطح پشتی جسم، افت قابل توجهی (حدود ۲۰ درجه سانتی گراد) نسبت به سطح جلویی دارد و این نکته را حل یک بعدی نشان نمی دهد.

جدول ۲ ضرایب انتقال حرارت و جرم همرفت میانگین را روی سطوح جسم نشان می دهد. این مقادیر در حل انتقال حرارت و جرم درون جسم استفاده می شوند. ضرایب انتقال حرارت (h) و ضرایب انتقال جرم (h_m) روی سطوح بالایی و پشتی مقادیری نزدیک به یکدیگر دارند؛ در حالی که در سطح جلویی، این مقادیر به شدت افزایش پیدا می کنند. به همین دلیل نرخ خشک شدن در سطح جلویی حدود ۳ برابر بیشتر از سطح بالایی و پشتی جسم است و این یعنی زمان خشک شدن انتهای سیب سه برابر ابتدای آن است.

همان طور که قبلاً ذکر شد، برای یافتن توزیع دما و رطوبت در داخل جسم، یک راه حل تحلیلی انجام می شود. به دلیل کاهش زمان و هزینه محاسبات، استقلال از شبکه حل انجام شده است. به این منظور در معادلات (۲۹) و (۴۶)، مقادیر i ، m ، n و j به ترتیب ۴، ۸ و ۱۶ انتخاب شده اند. دمای بی بعد در $(m \text{ و } n) = ۸$ و $(m \text{ و } n) = ۱۶$ تغییر چندانی نمی کند (اختلاف زیر ۲ درصد)، اما تفاوت آشکاری بین $(m \text{ و } n) = ۴$ و $(m \text{ و } n) = ۸$ به ویژه در زمان های اولیه وجود دارد، بنابراین $(m \text{ و } n) = ۸$ در معادله (۲۹) انتخاب می شود. همچنین به

$$\begin{aligned} \varphi'(x, y, t) &= (1 + b') \\ &\times \left\{ \sum_{j=0}^{\infty} B_j \left[\frac{h_{m1}}{D\xi_j} \sin(\xi_j x) \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + \cos(\xi_j x) \right] e^{-(\xi_j^2) \int_0^t D(t) dt} \right\} \\ &\times \left\{ \sum_{i=0}^{\infty} B_i \cos(\gamma_i y) e^{-(\gamma_i^2) \int_0^t D(t) dt} \right\} \\ &= \varphi(x, y, t) + b' \end{aligned} \quad (46)$$

مقادیر مشخصه (ξ_j و γ_i) و ضرایب ثابت (B_j و B_i) در رابطه ۴۶ مانند رابطه دمای بی بعد محاسبه می شوند و با فرض:

$$\begin{aligned} \sum F(x, y, t) &= \left\{ \sum_{j=0}^{\infty} B_j \left[\frac{h_{m1}}{D\xi_j} \sin(\xi_j x) \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + \cos(\xi_j x) \right] e^{-(\xi_j^2) \int_0^t D(t) dt} \right\} \\ &\times \left\{ \sum_{i=0}^{\infty} B_i \cos(\gamma_i y) e^{-(\gamma_i^2) \int_0^t D(t) dt} \right\} \end{aligned} \quad (47)$$

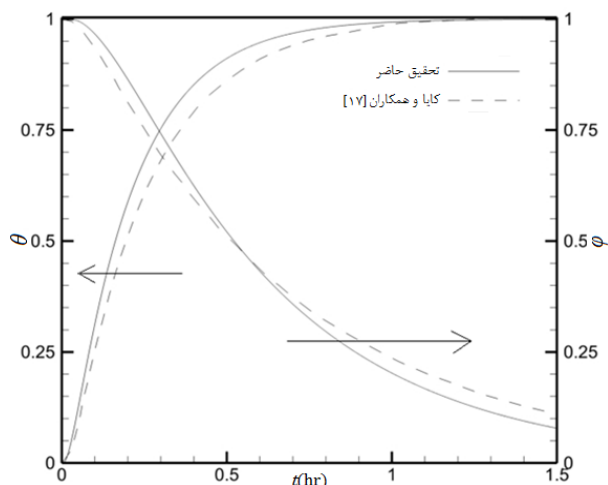
و بازنویسی رابطه ۴۶:

$$\begin{aligned} \varphi(x, y, t) - \sum F(x, y, t) &= b' \times \left(\sum F(x, y, t) - 1 \right) \end{aligned} \quad (48)$$

با توجه به رابطه ۴۸ مشخص می شود که b' یک رابطه خطی با سمت چپ معادله ۴۸ دارد. بنابراین اصل برهم نهی قابل استفاده است. b' بیان کننده ی یک سری گام های کوچک متوالی می باشد که به طور ضمنی از معادله انتقال حرارت محاسبه می شود. جزئیات بیشتر را می توان در تحقیق براتی و اصفهانی [۱] دید.

$$\begin{aligned} \varphi(x, y, t) - \sum F(x, y, t) &= \sum_{l=1}^p \Delta b'_l \\ &\times \left(\sum F(x, y, t - t_l) - 1 \right) \end{aligned} \quad (49)$$

که t_l نقطه ی شروع $\Delta b'$ و $t = p \times \Delta t$



شکل ۴: تغییرات دما و رطوبت بی بعد شده در طول زمان فرایند خشک کردن و مقایسه آن با نتایج کایا و همکاران [۱۷]

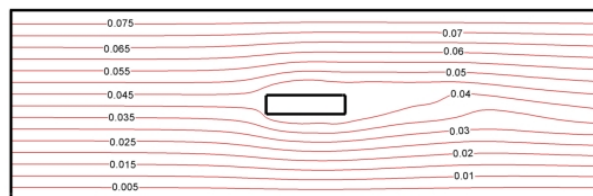
تولید آنتروپی در ابتدا برای سه نسبت ظاهری متفاوت جسم مرطوب محاسبه شده است. حجم جسم مرطوب در هر سه مورد یکسان می‌باشد. در نسبت ظاهری $ar=1-1$ ، طول و عرض جسم مرطوب ۴ سانتی‌متر و در نسبت ظاهری $ar=1-2$ ، طول و عرض جسم به ترتیب $2/83$ و $5/66$ سانتی‌متر و در نسبت ظاهری $ar=1-4$ ، طول و عرض جسم مرطوب به ترتیب ۸ و ۲ سانتی‌متر می‌باشد. جدول ۳، تولید آنتروپی کلی و مؤلفه‌های آن را برای سه نسبت ظاهری ذکر شده مقایسه می‌نماید. همان‌طور که مشاهده می‌شود، تولید آنتروپی ناشی از اصطکاک جریان ($S_{f,g}$) بسیار ناچیز بوده و تولید آنتروپی ناشی از انتقال حرارت جسم مرطوب ($S_{h,s}$) سهم عمده را در تولید آنتروپی دارد. همچنین دیده می‌شود که نسبت ظاهری $ar=1-1$ بیشترین تولید آنتروپی و نسبت ظاهری $ar=1-4$ کمترین تولید آنتروپی را دارد. بنابراین در ادامه‌ی تحقیق تمام موارد با نسبت ظاهری $ar=1-4$ انجام شده است. نتیجه‌ی دیگری که می‌توان گرفت این است که نسبت طول به عرض جسم مرطوب تا حد امکان که از لحاظ فیزیکی قابل اعمال باشد، باید بیشترین مقدار را داشته باشد تا کمترین آنتروپی تولید گردد.

همین روال، رطوبت بی بعد در $(j \text{ و } i)$ و $8 = (j \text{ و } i)$ تقریباً یکسان است، بنابراین $(j \text{ و } i) = 8$ در معادله (۴۶) استفاده شده است.

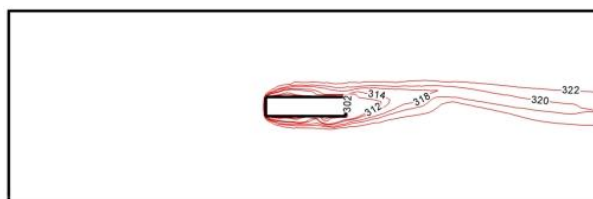
جدول ۲: ضرایب انتقال حرارت و جرم همرفت میانگین روی سطوح جسم

سطح	موقعیت	$h \text{ (W/m}^2\text{K)}$	$h_m \text{ (m/s)} \times 10^{-1}$
جلو	$x = 0$	۴۸/۱۷۶۹	۹/۶۳۵۴
	$0/0 \leq y \leq 0/1$		
بالا	$y = 0/0/1$	۱۵/۰۷۰۸	۳/۰۱۴۲
	$0/0 \leq x \leq 0/4$		
پشت	$x = 0/4$	۱۶/۰۹۶۷	۳/۲۱۹۳
	$0/0 \leq y \leq 0/1$		

شکل ۴ میزان دما و رطوبت بی بعد در مرکز جسم مرطوب را نشان می‌دهد. این شکل حل تحلیلی و عددی توزیع دما و رطوبت جسم مرطوب را مقایسه می‌کند. بیشترین تفاوت در حل تحلیل و عددی دما و رطوبت بی بعد به ترتیب $9/9\%$ و $10/2\%$ می‌باشد. با توجه به این که حل عددی با استفاده از ضرایب انتقال حرارت و جرم متغیر انجام شده و در حل تحلیلی، ضرایب انتقال حرارت و جرم میانگین به کار رفته است، این اختلاف قابل قبول می‌باشد.



شکل ۲: کانتور جریان اطراف جسم مرطوب

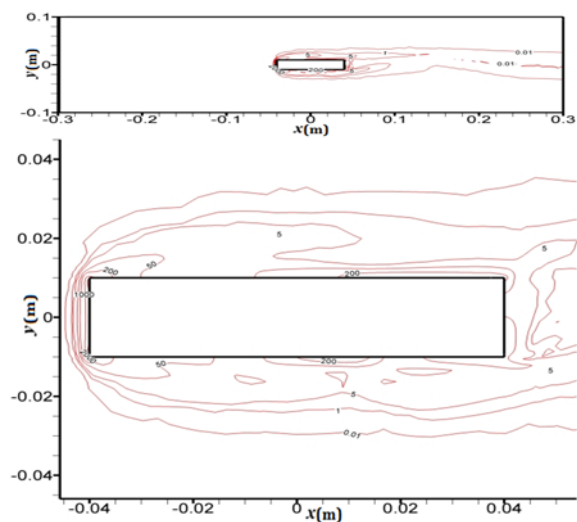


شکل ۳: کانتور دمای اطراف جسم مرطوب

جدول ۳: مؤلفه‌های تولید آنتروپی کلی برای سه نسبت ظاهری مختلف سیب

نسبت ظاهری (ar)	$S_{f,g}$ (W/ m^3K)	$S_{h,g}$ (W/ m^3K)	$S_{h,s}$ (W/ m^3K)	$S_{m,s}$ (W/ m^3K)	S_{tot} (W/ m^3K)
۱-۱	۰/۰۰۰۷	۹۵/۷	۱۱۰۵/۸	۹۱۲/۳	۲۱۱۳/۸
۱-۲	۰/۰۰۰۴	۸۴/۳	۹۵۱/۱	۷۶۸/۳	۱۸۰۳/۷
۱-۴	۰/۰۰۰۳	۷۷/۷	۷۱۲/۶	۵۴۸/۷	۱۳۳۹

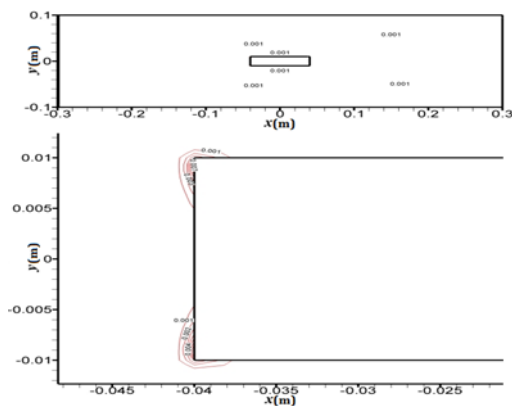
شکل ۵ تولید آنتروپی حرارتی جریان را نشان می‌دهد. به دلیل این‌که دیواره‌های جریان هم‌دمای هوای ورودی می‌باشد، تولید آنتروپی حرارتی در بخش زیادی از جریان صفر است؛ اما به دلیل اختلاف دمای جریان و جسم مرطوب در اطراف جسم مرطوب تولید آنتروپی زیادی داریم و مشاهده می‌شود که اثرات آن در جریان گذرنده از روی جسم در پشت آن نیز مشاهده می‌شود. با دقت در شکل بزرگنمایی شده، مشاهده می‌شود که هوای سطح جلویی جسم بیشترین تولید آنتروپی را دارد؛ زیرا با توجه به توزیع دمای جسم مرطوب، بیشترین ضریب انتقال حرارت همرفت مربوط به سطح جلویی جسم بوده و موجب انتقال حرارت بیشتر از این سطح می‌شود.



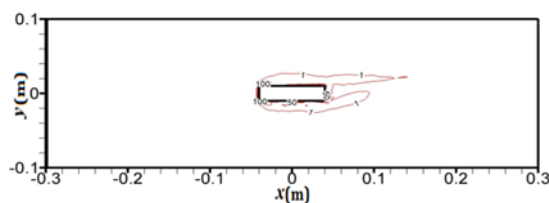
شکل ۵: تولید آنتروپی حرارتی جریان $Sh,g(W/m^3.K)$

شکل ۶ نیز تولید آنتروپی اصطکاکی جریان را نشان می‌دهد. به دلیل آرام بودن جریان، تولید آنتروپی اصطکاکی جریان در تمام جریان بسیار ناچیز است. با مشاهده‌ی شکل بزرگنمایی شده دیده می‌شود که به دلیل اغتشاشات اندکی که در عبور جریان در گوشه‌های جلویی جسم به وجود می‌آید، در این مناطق اندکی آنتروپی تولید می‌شود؛ اما به دلیل آرام بودن جریان و همچنین پایین بودن لزجت هوا، تولید

آنتروپی اصطکاکی جریان ناچیز بوده و در مقابل تولید آنتروپی حرارتی قابل صرف‌نظر کردن است و در شکل ۷ که تولید آنتروپی کل جریان را نشان می‌دهد، مشاهده می‌گردد که الگوی تولید آنتروپی کل جریان همانند تولید آنتروپی حرارتی جریان است. با توجه به شکل ۵، شکل ۶ و شکل ۷ می‌توان دریافت که تحلیل آنتروپی در اطراف جسم باید انجام شود تا زمان و هزینه تحلیل آنتروپی جریان کاهش یابد.

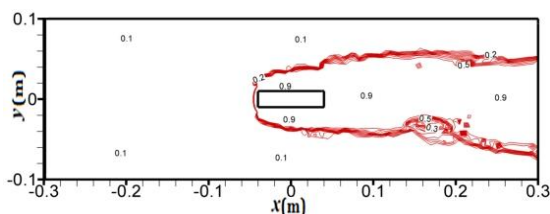


شکل ۶: تولید آنتروپی اصطکاکی جریان $Sf,g(W/m^3.K)$



شکل ۷: تولید آنتروپی کل جریان $Sg(W/m^3.K)$

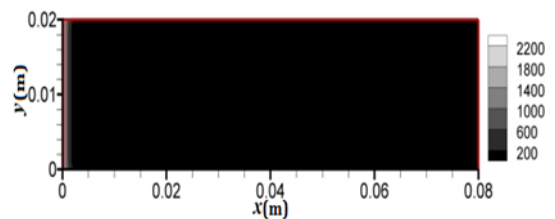
در شکل ۸ نیز عدد Be جریان دیده می‌شود. در اطراف جسم مرطوب و جریان گذرنده از روی آن که آنتروپی حرارتی غالب است، عدد Be تقریباً یک است اما در بقیه‌ی جریان، چون تولید آنتروپی حرارتی تقریباً صفر است و تولید آنتروپی اصطکاکی مقداری بسیار کم اما غیر صفر دارد، عدد Be جریان بسیار کم است.



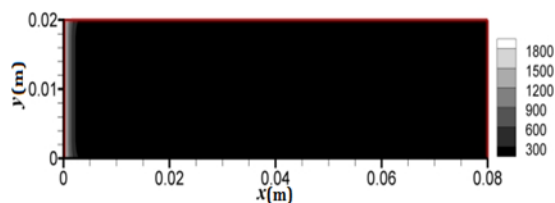
شکل ۸: عدد Be جریان

شکل ۹ تولید آنتروپی ناشی از انتقال حرارت جسم مرطوب را در چهار زمان ۵s، ۵۰s، ۵۰۰s و ۵۰۰۰s نشان می‌دهد. در لحظات اولیه، تولید آنتروپی شدیدی در سطح جلویی جسم به وجود می‌آید؛ که دلیل

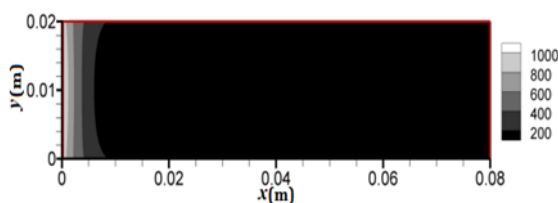
شکل ۱۰ نیز تولید آنتروپی ناشی از انتقال جرم جسم مرطوب را در چهار زمان $5s$ ، $50s$ ، $500s$ و $5000s$ نشان می‌دهد. کانتورهای تولید آنتروپی ناشی از انتقال جرم مشابه کانتورهای تولید آنتروپی ناشی از انتقال حرارت در لحظات اولیه در سطح جلویی شدید است و به تدریج این کانتورها بیضی شکل می‌شوند؛ زیرا ضریب انتقال جرم سطح جلویی بیشتر از دیگر سطوح است.



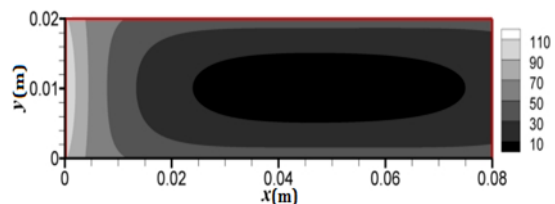
(الف)



(ب)



(پ)

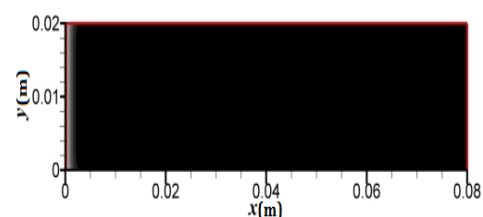


(ت)

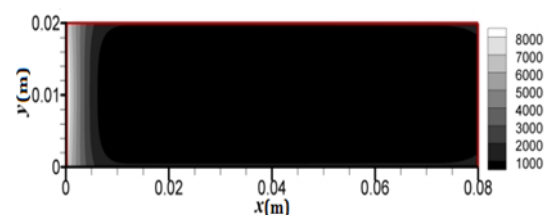
شکل ۱۰: تولید آنتروپی ناشی از انتقال جرم درون جسم مرطوب $S_{m,s}(W/m^3.K)$ در زمان‌های (الف) $5s$ ، (ب) $50s$ ، (پ) $500s$ و (ت) $5000s$

تفاوت تولید آنتروپی ناشی از انتقال جرم با تولید آنتروپی ناشی از انتقال حرارت این است که اولاً مقادیر تولید آنتروپی ناشی از انتقال

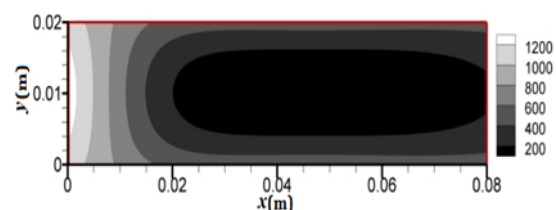
آن بالا بودن ضریب انتقال حرارت در سطح جلویی است. در زمان‌های بیشتر، کانتورهای تولید آنتروپی به تدریج شکل می‌گیرد. در نتیجه از محاسبه آنتروپی برای بهینه‌سازی زمان خشک کردن نیز می‌توان استفاده کرد. دیده می‌شود که تولید آنتروپی همانند توزیع دما، کانتورهای بیضی شکل دارد؛ زیرا در سطوح جسم که انتقال حرارت بیشتر است، آنتروپی بیشتری نیز تولید می‌شود و به دلیل بیشتر بودن ضریب انتقال حرارت همرفت سطح جلویی، تولید آنتروپی سطح جلویی بیشتر است که موجب می‌شود کانتورهای تولید آنتروپی به طرف سطح عقبی جسم کشیده شوند.



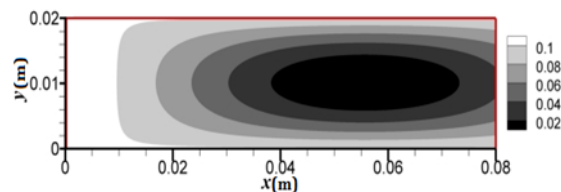
(الف)



(ب)



(پ)

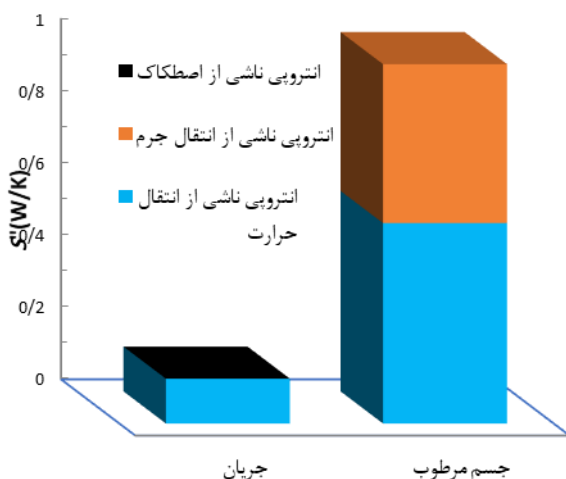


(ت)

شکل ۹: تولید آنتروپی ناشی از انتقال حرارت درون جسم مرطوب $S_{h,s}(W/m^3.K)$ در زمان‌های (الف) $5s$ ، (ب) $50s$ ، (پ) $500s$ و (ت) $5000s$

هر دو فرایند تولید آنتروپی ابتدا به یک مقدار بیشینه می‌رسند و سپس کاهش می‌یابند زیرا با توجه به رابطه‌ی (۲۱)، در ابتدا که تغییرات دما و رطوبت شدید است ترم‌های صورت کسر در این رابطه، غالب هستند و تولید آنتروپی مسیری صعودی را طی می‌کند اما پس از گذشت مدتی که شدت تغییرات دما و رطوبت کم می‌شود مخرج کسر یعنی مقادیر دما و رطوبت غالب می‌شوند و تولید آنتروپی نزولی می‌شود. چون در مخرج تولید آنتروپی حرارتی دما توان دو دارد تولید آنتروپی حرارتی با شیب زیادی کاهش می‌یابد اما در تولید آنتروپی ناشی از انتقال جرم، در مخرج کسر رطوبت توان یک دارد و تولید آنتروپی با شیب ملایمی کاهش می‌یابد.

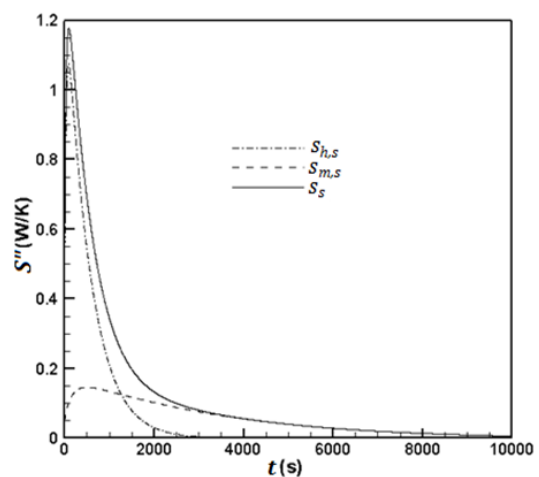
شکل ۱۲ سهم مکانیزم‌های مختلف تولید آنتروپی را در جسم مرطوب و جریان به‌طور جداگانه نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۱۲ دیده می‌شود که جسم مرطوب سهم بیشتری در تولید آنتروپی دارد. ۸۹٪ آنتروپی در جسم مرطوب و ۱۱٪ درصد دیگر در جریان تولید می‌شود. همچنین در کل سیستم ۶۹٪ تولید آنتروپی حرارتی است و ۳۹٪ دیگر تولید آنتروپی ناشی از انتقال جرم می‌باشد. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود از تولید آنتروپی اصطکاکی می‌توان صرف‌نظر کرد.



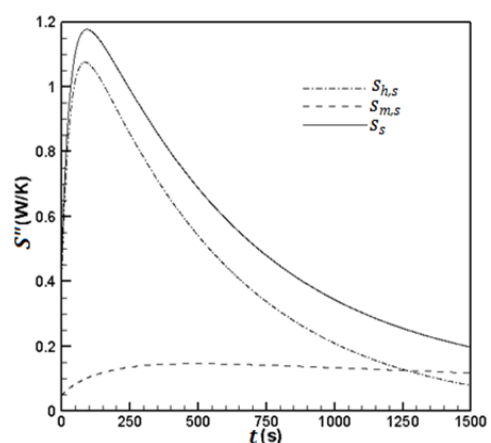
شکل ۱۲: سهم مکانیزم‌های مختلف تولید آنتروپی در جسم مرطوب و جریان برای داشتن راندمان بالا در صنعت خشک کردن، دستیابی به رطوبت نهایی کمتر جسم مرطوب باید هم‌زمان با تولید آنتروپی کمتر باشد. برای مقایسه‌ی تأثیر افزایش دما و سرعت جریان ورودی بر تولید آنتروپی، نمودار تولید آنتروپی - میزان رطوبت رسم می‌شود شکل ۱۳ نشان می‌دهد که افزایش تولید آنتروپی توسط افزایش دمای جریان

جرم از تولید آنتروپی ناشی از انتقال حرارت کمتر است و دوما کانتورهای تولید آنتروپی ناشی از انتقال جرم در زمان طولانی‌تری نسبت به کانتورهای تولید آنتروپی ناشی از انتقال حرارت شکل بیضی پیدا می‌کند. دلیل این پدیده نیز کندتر بودن انتقال جرم نسبت به انتقال حرارت است.

شکل ۱۱ تغییرات تولید آنتروپی جسم مرطوب با زمان را نشان می‌دهد. همان‌طور که گفته شد تولید آنتروپی حرارتی در زمان‌های ابتدایی مقادیر بیشتری نسبت به دیگر مکانیزم‌های تولید آنتروپی دارد اما به دلیل تعادل دمایی جسم و جریان مقدار آن به سرعت به کاهش می‌یابد اما تولید آنتروپی ناشی از انتقال جرم تا مدت‌های طولانی‌تری ادامه دارد.



(الف)



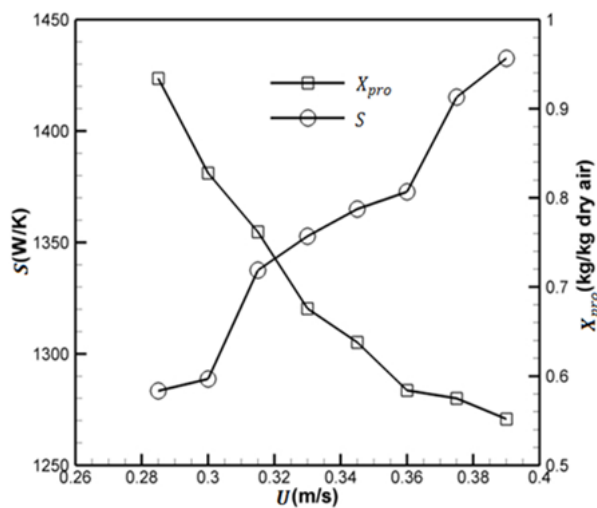
(ب)

شکل ۱۱: تغییرات تولید آنتروپی درون جسم مرطوب با زمان، (ب) بزرگنمایی تغییرات تولید آنتروپی درون جسم مرطوب با زمان

نتایج نشان می‌دهند که با افزایش سرعت ورودی جریان هوا، تولید آنتروپی نیز افزایش می‌یابد، در حالی که رطوبت نهایی جسم مرطوب کم می‌شود (شکل ۱۵).

شکل ۱۴ نشان می‌دهد که تولید آنتروپی با افزایش دما، تقریباً به صورت خطی افزایش می‌یابد و این در حالی است که نرخ کاهش رطوبت جسم مرطوب با افزایش دما کم می‌شود. با در نظر گرفتن نقطه‌ی تقاطع این دو نمودار به عنوان نقطه‌ی بهینه، $T_{\infty} = 330.7 \text{ K}$ را می‌توان دمای ورودی بهینه‌ی جریان برای این فرایند معرفی کرد، زیرا ترکیب مناسبی از کمترین میزان رطوبت و تولید آنتروپی را خواهد داد.

در شکل ۱۵ نیز همانند شکل ۱۴، نقطه‌ی تقاطع دو نمودار، ترکیب مناسبی از کمترین میزان رطوبت و تولید آنتروپی را نشان می‌دهد؛ بنابراین سرعت $U_{\infty} = 0.321 \frac{m}{s}$ به عنوان سرعت جریان ورودی بهینه در این فرایند انتخاب می‌شود.

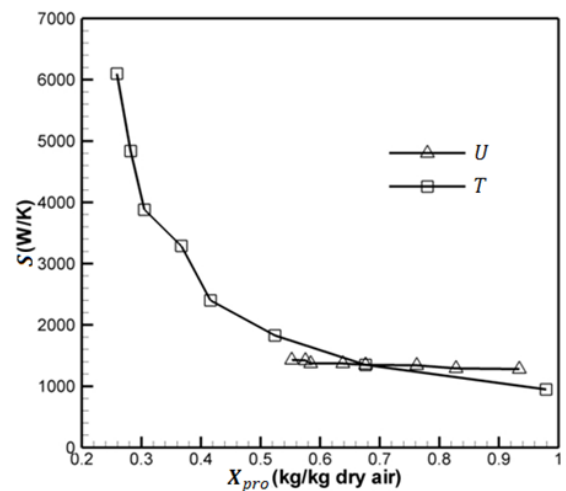


شکل ۱۵: تأثیر سرعت ورودی جریان بر تولید آنتروپی و رطوبت نهایی جسم مرطوب

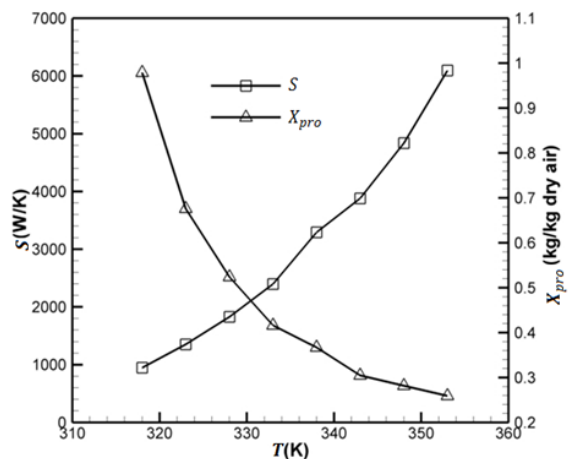
در شکل ۱۶ (الف) مشاهده می‌شود که تمام مؤلفه‌های تولید آنتروپی با افزایش دمای ورودی هوا، افزایش می‌یابند به جز تولید آنتروپی ناشی از اصطکاک جریان ($S_{p,g}$) که به دلیل ناچیز بودن مقادیر آن نسبت به دیگر مؤلفه‌های تولید آنتروپی، تغییرات آن در این نمودار قابل مشاهده نمی‌باشد. تغییرات تولید آنتروپی ناشی از انتقال حرارت درون جسم مرطوب ($S_{h,s}$) با بالا رفتن دمای ورودی هوا به طور چشمگیری افزایش می‌یابد، در حالی که تولید آنتروپی ناشی از انتقال جرم درون جسم مرطوب ($S_{m,s}$) و تولید آنتروپی ناشی از انتقال حرارت در جریان هوا ($S_{h,g}$) با شیب کمی افزایش می‌یابند. در شکل ۱۶ (ب) نیز به استثنای تولید آنتروپی ناشی از اصطکاک جریان

ورودی بسیار سریع‌تر از افزایش سرعت جریان ورودی می‌باشد و به این معنی می‌باشد که افزایش سرعت جریان ورودی نسبت به افزایش دمای جریان ورودی، در ضمن دستیابی به رطوبت کمتر، راندمان انرژی بالاتر را به همراه دارد. اگر کاهش میزان رطوبت نهایی جسم مرطوب مدنظر نباشد، کاهش دمای جریان ورودی، تولید آنتروپی کمتری نسبت به کاهش سرعت جریان ورودی خواهد داشت.

با توجه به این که افزایش دما و سرعت ورودی جریان هوا، رطوبت نهایی جسم مرطوب را کاهش می‌دهد، اثر این دو عامل بر تولید آنتروپی نیز بررسی شده است. تولید آنتروپی و رطوبت نهایی جسم مرطوب برای دماهای متفاوت هوای ورودی (شکل ۱۴) و سرعت‌های مختلف هوای ورودی (شکل ۱۵) محاسبه شده است.



شکل ۱۳: رابطه‌ی تولید آنتروپی و رطوبت نهایی درون جسم مرطوب



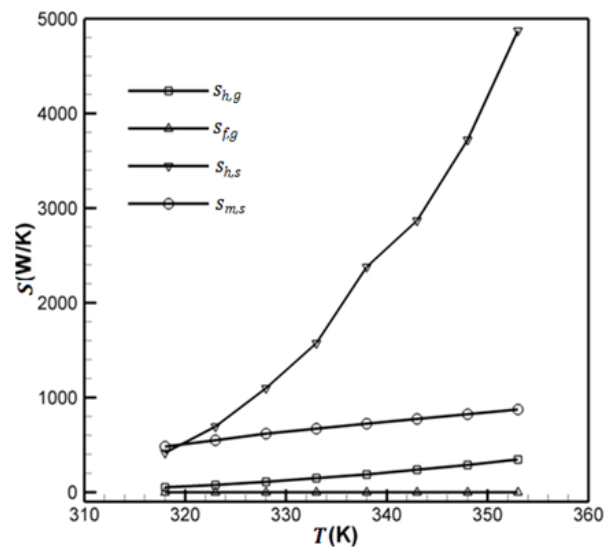
شکل ۱۴: تأثیر دمای ورودی جریان بر تولید آنتروپی و رطوبت نهایی در جسم مرطوب

۵- نتیجه‌گیری

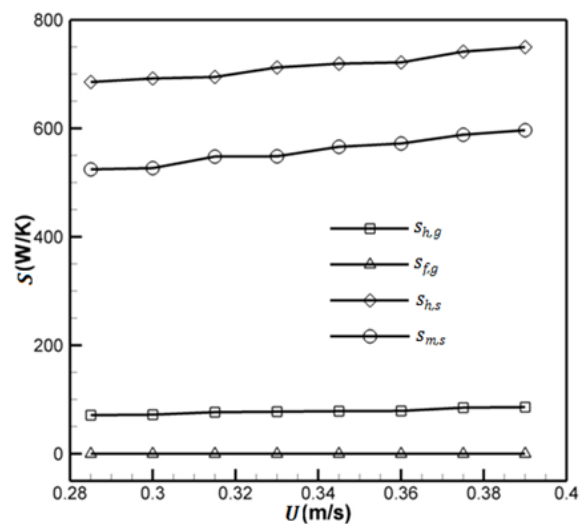
در تحقیق انجام شده، پس از حل تحلیلی دوبعدی توزیع دما و رطوبت در جسم مرطوب، تولید آنتروپی در فرایند خشک کردن یک قطعه سیب به شیوه‌ی همرفت به‌صورت دیفرانسیلی بررسی گردید و نقش عوامل تأثیرگذار بر تولید آنتروپی هم‌چون نسبت ظاهری جسم مرطوب و دما و سرعت ورودی جریان هوا تحلیل شد که مهم‌ترین نتایج آن عبارت‌اند از:

- هر چه نسبت ظاهری جسم مرطوب کم شود، تولید آنتروپی نیز کاهش می‌یابد که در این تحقیق نسبت ظاهری $ar=1-4$ به‌عنوان نسبت بهینه استفاده شده است. افزایش دما و سرعت ورودی جریان، تولید آنتروپی را افزایش داده اما رطوبت نهایی جسم را کاهش می‌دهد و محصول خشک تری به دست می‌آید.
- توجه به میزان رطوبت نهایی جسم مرطوب و تولید آنتروپی، یک مقدار بهینه برای دما و سرعت ورودی جریان به دست می‌آید که مقدار بهینه برای دما و سرعت جریان هوای ورودی به ترتیب $(T_\infty = 330.7\text{ K})$ و $(U_\infty = 0.321\text{ m/s})$ می‌باشد.
- افزایش دمای جریان هوا نسبت به افزایش سرعت جریان، تولید آنتروپی بیشتری دارد و می‌توان آنتروپی ناشی از اصطکاک را در مقابل آنتروپی ناشی از حرارت در جریان صفر در نظر گرفت.
- در تحلیل دیفرانسیلی آنتروپی فرایند خشک کردن، تأثیر تمام نقاط حوزه‌ی حل به وضوح مشاهده گردید و مشخص شد که جسم مرطوب تولید آنتروپی بسیار بیشتری نسبت به جریان هوا دارد و در بهینه‌سازی فرایند، نقش مهم‌تری ایفا می‌کند. ۸۹٪ آنتروپی در جسم مرطوب و ۱۱٪ درصد دیگر در جریان تولید می‌شود. همچنین در کل سیستم ۶۹٪ تولید آنتروپی حرارتی است و ۳۹٪ دیگر تولید آنتروپی ناشی از انتقال جرم می‌باشد.

$(S_{p,g})$ که تغییرات آن به دلیل مقدار ناچیزش دیده نمی‌شود، دیگر مؤلفه‌های تولید آنتروپی با زیاد شدن سرعت جریان ورودی افزایش می‌یابند، که این افزایش برای تمام مؤلفه‌ها تقریباً خطی با شیب ملایم می‌باشد. با مقایسه‌ی شکل ۱۶ (الف) و (ب) مشاهده می‌شود که جریان هوا سهم بسیار کمتری را نسبت به جسم مرطوب در تولید آنتروپی داراست و هم‌چنین می‌توان دریافت که تولید آنتروپی ناشی از انتقال حرارت در جسم مرطوب $(S_{h,s})$ بیشترین نقش را در تولید آنتروپی کل فرایند دارد و این عامل با افزایش دما، بازدهی سیستم را بسیار کاهش خواهد داد.



(الف)



(ب)

شکل ۱۶: مؤلفه‌های تولید آنتروپی در (الف) دماهای مختلف برای هوای ورودی و (ب) سرعت‌های متفاوت برای هوای ورودی

۶- فهرست علائم

علائم انگلیسی	
نسبت ظاهری	ar
عدد بژان	Be
گرمای ویژه در فشار ثابت ($\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$)	C_p
ضریب نفوذ رطوبت (m^2s^{-1})	D
ضریب هدایت گرمایی ($\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$)	k
عدد لوییس	Le
تولید آنتروپی بر واحد حجم ($\text{Wm}^{-3}\text{K}^{-1}$)	S
تولید آنتروپی (WK^{-1})	S''
دما (K)	T
زمان (t)	t
سرعت در راستای x (ms^{-1})	U
سرعت در راستای y (ms^{-1})	V
میزان رطوبت (kg/kg of dry air)	X
علائم یونانی	
نفوذ حرارتی (m^2s^{-1})	α
مقادیر مشخصه	$\gamma, \zeta, \beta, \lambda$
چگالی (kgm^{-3})	ρ
دمای بی بعد	θ
رطوبت بی بعد	φ
لزجت دینامیکی ($\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$)	μ
زیرنویس	
جریان هوای ورودی	∞
اولیه	0
ناشی از اصطکاک	f
جریان هوا	g
ناشی از انتقال حرارت	h
ناشی از انتقال جرم	m
جسم مرطوب	s
محصول خشک شده	Pro

۷- منابع

No. 6, pp. 722-734, 2019, DOI: [10.1080/07373937.2018.1458036](https://doi.org/10.1080/07373937.2018.1458036). (in Persian)

[4] H. Majdi and J. A. Esfahani, "Energy consumption and drying time optimization of convective drying for performance improvement: Response surface methodology and lattice Boltzmann method," *Journal of Heat Transfer*, Vol. 140, No. 10, Art. no. 102009, 2018, DOI: [10.1115/1.4040259](https://doi.org/10.1115/1.4040259). (in Persian)

[5] H. Majdi, J. A. Esfahani, and M. Mohebbi, "Optimization of convective drying by response surface methodology," *Computers and Electronics in Agriculture*, Vol. 156, pp. 574-584, 2019, DOI: [10.1016/j.compag.2018.12.021](https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.12.021). (in Persian)

[6] M. Boghrati, "Entropy generation minimization of confined nanofluids laminar flow around a block," *Science and Technology in Mechanical Engineering*, Vol. 2, No. 1, pp. 77-85, 2023, DOI: [10.22034/stme.2023.410125.1043](https://doi.org/10.22034/stme.2023.410125.1043). (in Persian)

[7] S. K. Som and A. Datta, "Thermodynamic irreversibilities and exergy balance in combustion processes," *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 34, No. 3, pp. 351-376, 2008, DOI: [10.1016/j.pecs.2007.09.001](https://doi.org/10.1016/j.pecs.2007.09.001).

[8] I. Janghorban Esfahani, S. C. Lee, and C. K. Yoo, "Evaluation and optimization of a multi-effect evaporation-absorption heat pump desalination based conventional and advanced exergy and exergoeconomic analyses," *Desalination*, Vol. 359, pp. 92-107, 2015, DOI: [10.1016/j.desal.2014.12.030](https://doi.org/10.1016/j.desal.2014.12.030). (in Persian)

[9] J. Y. San, W. M. Worek, and Z. Lavan, "Entropy generation in combined heat and mass transfer," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 30, No. 7, pp. 1359-1369, 1987, DOI: [10.1016/0017-9310\(87\)90168-2](https://doi.org/10.1016/0017-9310(87)90168-2).

[10] J. Herpe, D. Bougeard, S. Russeil, and M. Stanciu, "Numerical investigation of local entropy production rate of a finned oval tube with vortex generators," *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 48, No. 5, pp. 922-935, 2009, DOI: [10.1016/j.ijthermalsci.2008.07.006](https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2008.07.006).

[11] A. Hosseinpour, A. Akhoundzadeh Yamchi, M. Feyzollahzadeh, A. Moradians, and F. Khayatinejad, "Thermodynamic analysis, heat

[1] E. Barati and J. A. Esfahani, "A novel approach to evaluate the temperature during drying of food products with negligible external resistance to mass transfer," *Journal of Food Engineering*, Vol. 114, No. 1, pp. 39-46, 2013, DOI: [10.1016/j.jfoodeng.2012.07.028](https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2012.07.028). (in Persian)

[2] J. A. Esfahani, H. Majdi, and E. Barati, "Analytical two-dimensional analysis of the transport phenomena occurring during convective drying: Apple slices," *Journal of Food Engineering*, Vol. 123, pp. 87-93, 2014, DOI: [10.1016/j.jfoodeng.2013.09.019](https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2013.09.019). (in Persian)

[3] H. Majdi and J. A. Esfahani, "Energy and drying time optimization of convective drying: Taguchi and LBM methods," *Drying Technology*, Vol. 37,

value chain using exergy waste: Study case: Drying and greenhouse growing of tomato," *Energy Procedia*, Vol. 57, pp. 1437-1446, 2014, DOI: [10.1016/j.egypro.2014.10.135](https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.10.135).

[16] A. M. Nikbakht, A. Motevali, and S. Minaei, "Energy and exergy investigation of microwave assisted thin-layer drying of pomegranate arils using artificial neural networks and response surface methodology," *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, Vol. 13, No. 2, pp. 81-91, 2014, DOI: [10.1016/j.jssas.2013.01.005](https://doi.org/10.1016/j.jssas.2013.01.005). (in Persian)

[17] A. Kaya, O. Aydin, and I. Dincer, "Numerical modeling of heat and mass transfer during forced convection drying of rectangular moist objects," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 49, No. 17-18, pp. 3094-3103, 2006, DOI: [10.1016/j.ijheatmasstransfer.2006.01.043](https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2006.01.043).

[18] F. P. Incropera and D. P. DeWitt, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, 4th ed. New York, NY, USA: John Wiley & Sons, 1996.

[19] V. S. Arpaci, *Conduction Heat Transfer*. Reading, MA, USA: Addison-Wesley, 1966.

transfer, and modeling of infrared drying of nettle," *Quarterly Journal of Agricultural Machinery Mechanics Research*, Vol. 13, No. 2, 2024. (in Persian)

[12] S. Keramat Bacheh Jaki, F. Sharifian, and A. Naghali, "Analysis of mass and heat transfer of willow leaves during drying with ultrasonic pretreatment in an infrared dryer," in *Proceedings of the 15th National Congress and 1st International Congress of Biosystems Mechanical Engineering and Agricultural Mechanization*, 2023. (in Persian)

[13] M. Aghbashlo, M. H. Kianmehr, and A. Arabhosseini, "Energy and exergy analyses of thin-layer drying of potato slices in a semi-industrial continuous band dryer," *Drying Technology*, Vol. 26, No. 12, pp. 1501-1508, 2008, DOI: [10.1080/07373930802412231](https://doi.org/10.1080/07373930802412231). (in Persian)

[14] J. Viganó, E. Azuara, V. R. N. Telis, C. I. Beristain, M. Jiménez, and J. Telis-Romero, "Role of enthalpy and entropy in moisture sorption behavior of pineapple pulp powder produced by different drying methods," *Thermochimica Acta*, Vol. 528, pp. 63-71, 2012, DOI: [10.1016/j.tca.2011.11.011](https://doi.org/10.1016/j.tca.2011.11.011).

[15] T. Ramirez, Y. Meas, and K. Gottschalk, "Energy interaction of sub-processes in drying