

Analytical–Numerical Analysis of the Mechanical Behavior of the Central Thermocouple Protection Tube in a Direct Reduction Furnace.

Hasan Rahimzadeh Moghaddam ¹, Yadollah Alinia ^{1*}, Mohsen Taghizadeh ¹

¹ Faculty of Engineering, Hakim Sabzevari University, Sabzevar, Iran

ABSTRACT

The failure of the central thermocouple protection tube, the primary temperature-monitoring component in direct-reduction furnaces, is investigated. Failure of this critical component disrupts production and increases maintenance costs. This study aims to identify the dominant failure mechanisms and establish a scientific framework for optimizing tube design and extending its service life. A finite element model incorporating the coupled Eulerian-Lagrangian approach was developed in Abaqus to simulate granular material flow and pressure distribution along the furnace centerline, where the protection tube is located. The numerical model was validated against the Janssen analytical model and the Eurocode design standard. Subsequently, the effects of yielding, fatigue, creep, and their combined interaction on tube failure were evaluated. The results indicate that creep is the dominant degradation mechanism at the operating temperature of 800 °C, significantly reducing the tube's durability and service life. Furthermore, the tube geometry and material properties were found to have a substantial influence on the stress distribution and structural integrity. By integrating advanced numerical simulations with classical analytical models, the proposed framework provides a reliable tool for service-life prediction and design optimization, contributing to improved operational reliability and reduced maintenance costs in direct-reduction furnaces.

KEYWORDS

Finite Element Method, Coupled Eulerian–Lagrangian Method, Granular Materials, Thermocouple Protection Tube, Failure Analysis

* Corresponding Author: Email: y.alinia@hsu.ac.ir

1. Introduction

Direct reduction furnaces are key technologies in the steel industry for converting iron ore pellets into sponge iron. The stable operation of these furnaces relies on precise temperature monitoring using thermocouples housed in protection tubes, which often fail under severe mechanical stresses induced by high-temperature granular flow. While granular flow behavior is extensively studied in silos [1-4] using methods like the Discrete Element Method (DEM) [5,6] and Arbitrary Lagrangian-Eulerian (ALE) formulations [7,8], the Coupled Eulerian-Lagrangian (CEL) approach effectively prevents mesh distortion during large deformations [9-11]. However, prior studies have predominantly focused on mechanical flow behaviors, neglecting the direct impact of high operating temperatures on internal components. Therefore, the main novelty of this work is predicting the service life of the central thermocouple protection tube under actual direct reduction furnace conditions. By combining analytical calculations based on the Eurocode standard with CEL numerical simulations, this study comprehensively evaluates temperature-dependent stress behaviors and simultaneous failure mechanisms, including yielding, fatigue, and creep.

2. Methodology

The mechanical loads exerted on the thermocouple protection tube by the granular flow of iron ore pellets were initially calculated using the Janssen analytical model and the Eurocode design standard [3,4]. Figure 1 illustrates the geometry of the thermocouple protection tube and its position within the direct reduction furnace. Assuming a uniform mass flow, the vertical and the lateral pressure distributions were determined based on the material's bulk density, the internal friction, and the lateral pressure ratio, applying Eurocode correction factors for critical discharge conditions.

For a detailed dynamic analysis, a 3D numerical simulation was performed in Abaqus/Explicit utilizing the Coupled Eulerian-Lagrangian (CEL) approach, which effectively manages large deformations without mesh distortion. The granular material was modeled in the Eulerian domain utilizing the Mohr-Coulomb plasticity criterion [12], while the furnace wall was defined as a Lagrangian discrete rigid body. A general contact algorithm with a penalty formulation simulated the dynamic interactions. The main components of the CEL model and the meshing strategy are illustrated in Figure 2.

To evaluate long-term structural integrity, a 2D axisymmetric finite element model of the tube's inner

section (the critical high-stress region) was developed to simulate time-dependent deformation at 800 °C. The tube, constructed from Incoloy 800 alloy, was modeled using a power-law creep formulation [13-15]. The structural analysis was driven by the axial and lateral loads extracted directly from the CEL simulation. The overall lifespan was then analytically assessed by evaluating yield limits, fatigue (assuming a 5% oscillatory flow pressure based on ASME standards), pure creep, and a linear cumulative damage model for the combined fatigue-creep mechanisms

3. Results and Discussion

The numerical simulation successfully captured the dynamic behavior and real-time filling/discharge processes of the granular material. After the system reached a steady state (approximately at 50 s), the numerical lateral pressure distribution along the central axis of the furnace closely matched the analytical Eurocode predictions, demonstrating the high accuracy of the CEL model (Figure 3). Consequently, the axial forces and stresses exerted on the thermocouple protection tube were calculated. A section-by-section comparison revealed that the maximum axial stress occurs at the inner section of the tube. The numerical method predicted a maximum stress of 29.64 MPa, which was in excellent agreement with the analytical calculation of 29.32 MPa, yielding a relative difference of less than 5%.

To identify the dominant failure mechanism, the tube's structural response was evaluated against yield, fatigue, and creep criteria under an operating temperature of 800 °C. The critical effective stress during the discharge phase (33.72 MPa) was found to be well below the 120 MPa yield strength of Incoloy 800 at this temperature, ruling out immediate plastic failure. Fatigue analysis, based on ASME standards assuming a 5% oscillatory pressure flow, resulted in an acceptable safety factor of 2.8 and an estimated pure fatigue life of 55,500 hours. However, creep proved to be the most destructive factor. Analytical and numerical creep assessments estimated the pure creep life at approximately 27,700 and 26,900 hours, respectively (a less than 5% deviation). Applying a linear cumulative damage model for simultaneous fatigue and creep reduced the overall effective lifespan of the tube to roughly 18,500 hours, confirming creep as the primary failure mechanism.

To enhance the tube's durability, two geometrical modifications were proposed and evaluated. First, increasing the inner shell thickness from 4 mm to 4.5 mm reduced the axial stress to 30.13 MPa, extending

the combined operational lifespan to 26,000 hours (a 40% improvement).

Second, a more effective load-redistribution strategy was applied by increasing the lengths of the outer and middle sections by 2 m and 1 m, respectively. This modification significantly smoothed the stress distribution across the tube's depth, successfully dropping the maximum axial stress to 26.86 MPa. This design optimization drastically increased the pure creep life to 100,000 hours and elevated the combined fatigue-creep lifespan to 35,700 hours, yielding a remarkable 90% improvement over the original design.

4. Conclusions

In this study, a comprehensive framework combining Eurocode-based analytical calculations and the Coupled Eulerian-Lagrangian (CEL) numerical simulations was developed to evaluate the mechanical behavior of a central thermocouple protection tube in a direct reduction furnace. The developed CEL model accurately predicted granular flow dynamics, pressure distributions, and axial stresses, demonstrating a

deviation of less than 5% from conventional analytical models. Comprehensive failure analysis revealed that at an operating temperature of 800 °C, creep is the dominant degradation mechanism, limiting the tube's combined fatigue-creep service life to approximately 18,500 hours. By implementing geometrical modifications, specifically increasing the inner shell thickness or extending the upper sections to redistribute loads, the maximum axial stress was significantly reduced. These structural optimizations enhanced the tube's effective lifespan by 40% and 90%, respectively.

Ultimately, this coupled analytical-numerical approach provides a robust and reliable methodology for the optimal design of furnace internals, promising enhanced operational reliability, minimized production downtime, and reduced maintenance costs in the steel industry.

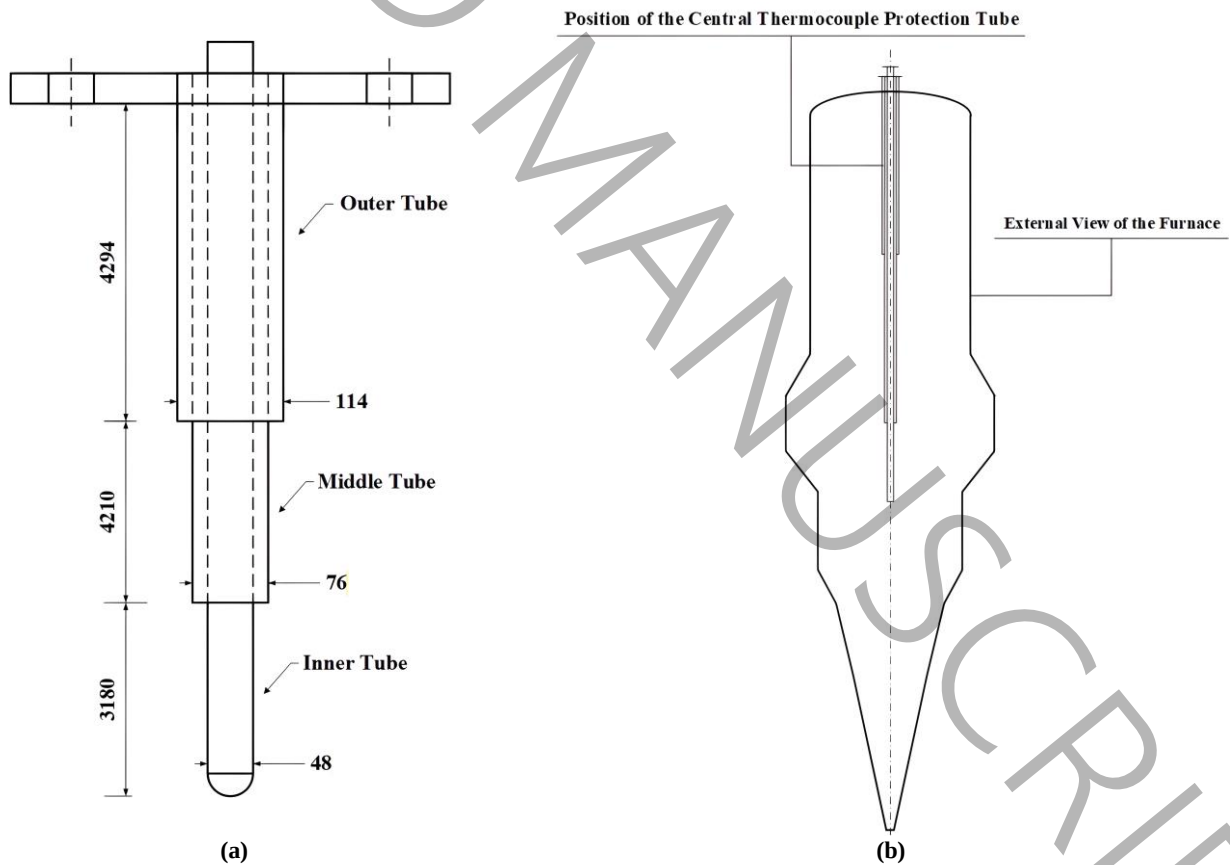


Fig. 1. (a) Geometry of the thermocouple protection tube (b) Position of the central thermocouple protection tube inside the furnace (all dimensions are in millimeters).

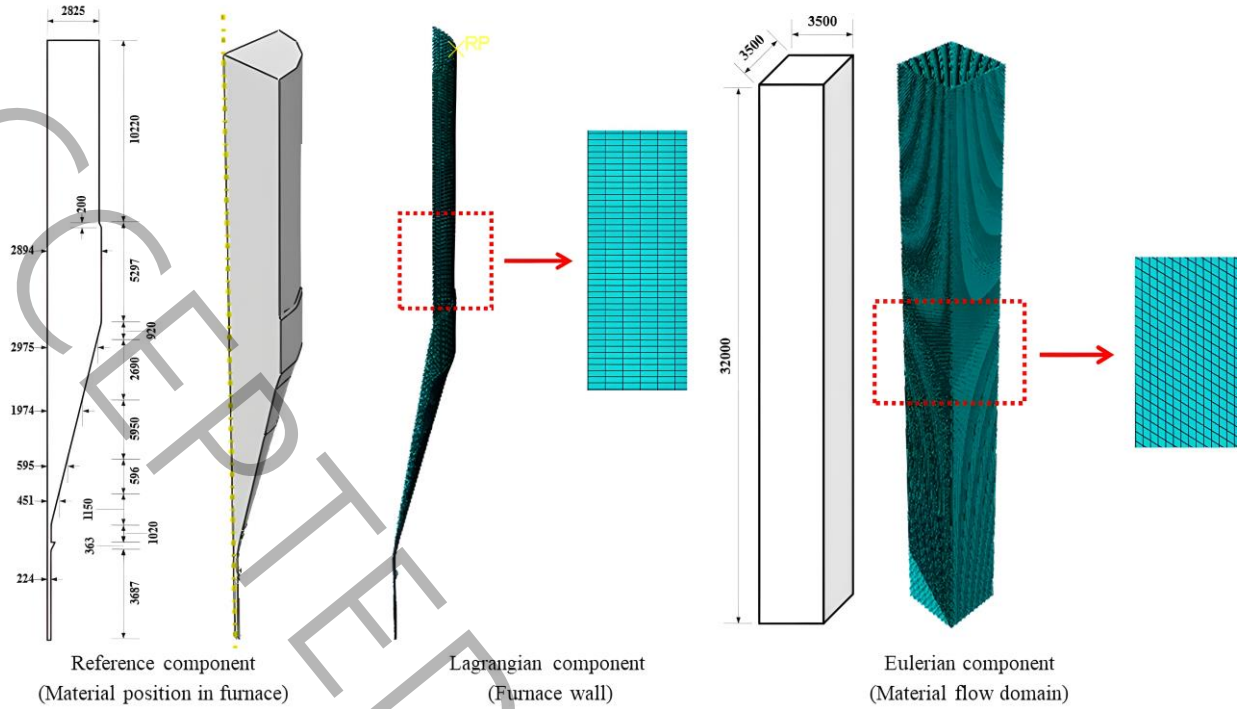


Fig. 2. Schematic of the dimensions and meshing of each model component (all dimensions are in millimeters)

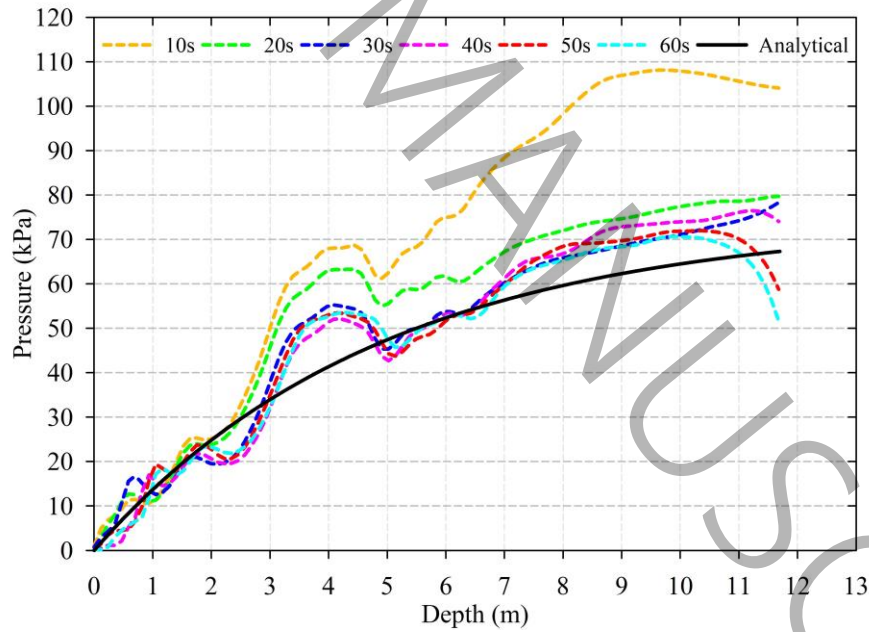


Fig. 3. Lateral pressure variation along the central axis of the furnace versus depth during the discharge process, and comparison of the results with analytical prediction.

5. References

- [1] R.M. Nedderman, Statics and kinematics of granular materials, (No Title), (1992).
- [2] D. Schulze, Powders and bulk solids: behavior, characterization, storage and flow, Springer, 2008.
- [3] B. EN, 4: 2006 "Eurocode 1–Actions on structures–Part 4: Silos and Tanks", British Standard, (2006).
- [4] H. Janssen, Versuche uber getreidedruck in silozellen, Z. ver. deut. Ing., 39 (1895) 1045.
- [5] C. González-Montellano, E. Gallego, Á. Ramírez-Gómez, F. Ayuga, Three dimensional discrete element models for simulating the filling and emptying of silos: Analysis of numerical results, Computers & chemical engineering, 40 (2012) 22-32.

- [6] F.O. Boechat, R.M. de Carvalho, L.M. Tavares, Simulation of mechanical degradation of iron ore pellets in a direct reduction furnace, *KONA Powder and Particle Journal*, 35 (2018) 216-225.
- [7] Y. Wang, Y. Lu, J.Y. Ooi, Numerical modelling of dynamic pressure and flow in hopper discharge using the Arbitrary Lagrangian–Eulerian formulation, *Engineering Structures*, 56 (2013) 1308-1320.
- [8] Y. Wang, Y. Lu, J.Y. Ooi, A numerical study of wall pressure and granular flow in a flat-bottomed silo, *Powder Technology*, 282 (2015) 43-54.
- [9] G. Qiu, S. Henke, J. Grabe, Application of a Coupled Eulerian–Lagrangian approach on geomechanical problems involving large deformations, *Computers and Geotechnics*, 38(1) (2011) 30-39.
- [10] C.-H. Lin, C. Hung, T.-Y. Hsu, Investigations of granular material behaviors using coupled Eulerian-Lagrangian technique: From granular collapse to fluid-structure interaction, *Computers and Geotechnics*, 121 (2020) 103485.
- [11] J.H. Rhee, S.I. Kim, Y.M. Lim, M.K. Kim, Finite element investigation of load acting on the hotspot detector located inside the silo caused by material discharge, *Applied Sciences*, 10(17) (2020) 5916.
- [12] J. Brown, Numerical analysis of silo discharge, (2008).
- [13] Incoloy Alloys 800H & 800HT, SMC-047, Special Metals Corporation, New Hartford, NY, 2004, in.
- [14] R. Wolwowitz, Creep-rupture properties of Incoloy 800H, 2-1/4 Cr-1 Mo, and Hastelloy X alloys in simulated HTGR environment, General Atomic Co., San Diego, Calif.(USA), 1976.
- [15] M. Booker, Analytical representation of the creep and creep-rupture behavior of Alloy 800h, Oak Ridge National Lab., TN (USA), 1978.

بررسی تحلیلی-عددی رفتار مکانیکی غلاف ترموکوپل مرکزی در کوره احیای مستقیم

حسن رحیمزاده مقدم^۱، یدالله علی نیا^{۲*}، محسن تقی زاده^۱

۱- دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران

ایمیل نویسنده عهده دار مکاتبات: y.alinia@hsu.ac.ir

چکیده

در این پژوهش، مسئله خرابی غلاف محافظ ترموکوپل مرکزی به عنوان ابزار اصلی پایش دما در کوره های احیای مستقیم، مورد بررسی قرار گرفته است. خرابی این قطعه حیاتی موجب اختلال در فرآیند تولید و افزایش هزینه های نگهداری می شود. هدف این پژوهش، شناسایی مکانیزم های مؤثر بر خرابی و ارائه چارچوبی علمی برای بهینه سازی طراحی و افزایش عمر غلاف است. بدین منظور، با استفاده از روش اجزای محدود و رویکرد کوپل اویلری-لاگرانژی در نرم افزار آباکوس، جریان دینامیکی مواد دانه ای و توزیع فشار در امتداد محور مرکزی کوره، محل قرارگیری غلاف ترموکوپل، شبیه سازی گردید. مدل عددی توسعه یافته با نتایج مدل های تحلیلی متداول از جمله مدل جانسن و استاندارد طراحی یوروکد مقایسه و صحت سنجی شد. سپس، مکانیزم های مختلف خرابی شامل تسلیم، خستگی، خزش و اثر ترکیبی آن ها بررسی گردید. نتایج نشان داد که در دمای کاری ۸۰۰ درجه سانتیگراد، مکانیزم خزش عامل اصلی کاهش دوام و عمر غلاف است. همچنین هندسه و جنس غلاف نقش تعیین کننده ای در رفتار تنش و عمر کاری آن دارند. مدل ارائه شده با ترکیب تحلیل های عددی و روابط کلاسیک، چارچوبی معتبر برای پیش بینی عمر و طراحی بهینه غلاف فراهم کرده است که می تواند موجب افزایش قابلیت اطمینان و کاهش هزینه های تعمیر و نگهداری در کوره های احیای مستقیم شود.

کلمات کلیدی:

روش اجزای محدود، روش کوپل اویلری-لاگرانژی، مواد دانه ای، غلاف محافظ ترموکوپل، تحلیل خرابی

۱- مقدمه

کوره های احیای مستقیم از فناوری های کلیدی در صنعت فولاد محسوب می شوند و وظیفه تبدیل گندله سنگ آهن^۱ به آهن اسفنجی^۲ را بر عهده دارند. عملکرد پایدار این کوره ها نیازمند پایش دقیق متغیرهای فرآیندی به ویژه دما است که این وظیفه توسط ترموکوپل های درون غلاف های محافظ انجام می شود. غلاف به دلیل تماس مستقیم با جریان مواد دانه ای در دمای بالا تحت تنش های شدید مکانیکی قرار دارد و خرابی آن می تواند موجب توقف فرآیند و زیان های اقتصادی قابل توجه شود. از این رو، تحلیل مکانیزم های خرابی و ارائه راهکارهایی برای افزایش عمر مفید غلاف در بهره برداری ایمن و پایدار کوره حائز اهمیت است. با توجه به اینکه بخش قابل توجهی از دانش موجود درباره جریان مواد دانه ای، توزیع فشار و اثر آن بر دیواره ها و تجهیزات داخلی از مطالعات انجام شده در حوزه سیلوها حاصل شده است، بسیاری از پژوهش های پیشین بر شبیه سازی عددی و تحلیلی این پدیده ها در سیلوها متمرکز بوده اند. از این رو، مرور این مطالعات می تواند مبنای مناسبی برای تحلیل رفتار مواد و بارهای وارد بر غلاف ترموکوپل در کوره های احیای مستقیم فراهم کند [۸ - ۱۰].

گونزالز-مونتیانو^۳ و همکاران [۱] با استفاده از روش اجزای گسسته^۴، رفتار مکانیکی مواد دانه ای را در فرآیند بارگیری و تخلیه سیلوها بررسی کردند. هدف آن ها ارزیابی توان مدل های سه بعدی در پیش بینی توزیع فشار، الگوی جریان و چگالی حجمی بود. نتایج پژوهش آنها نشان داد که مدل های توسعه یافته با در نظر گرفتن شکل و اندازه واقعی ذرات، رفتار مواد را با دقت بالا شبیه سازی

¹ Iron Ore Pellet

² Sponge Iron

³ González-Montellano

⁴ Discrete Element Method (DEM)

می‌کنند. همچنین مشخص شد که ویژگی‌های هندسی ذرات مانند تفاوت بین دانه‌های شیشه‌ای و ذرت، تأثیر مستقیم بر توزیع فشار و الگوی جریان دارد.

بوچات^۱ و همکاران [۲]، تخریب مکانیکی گندله‌های سنگ‌آهن را در کوره احیای مستقیم بررسی کردند. هدف آن‌ها ارزیابی تولید ذرات ریز ناشی از برخورد گندله‌ها و تأثیر آن بر بازدهی فرآیند بود. بدین منظور، جریان عمودی گندله‌ها به کمک روش اجزای گسسته شبیه‌سازی و انرژی برخورد محاسبه شد. نتایج با داده‌های تجربی کوره صنعتی مقایسه و اعتبارسنجی گردید و نشان داد میزان تولید ذرات ریز در ناحیه احیا بین ۳/۴ درصد تا ۴/۶ درصد است و با افزایش ظرفیت کوره افزایش می‌یابد. آن‌ها در پژوهش خود ضمن تأیید کارایی روش اجزای گسسته، به محدودیت آن در نیاز به توان محاسباتی زیاد و زمان تحلیل بالا اشاره کرده‌اند.

وانگ^۲ و همکاران [۳ و ۴] در دو مطالعه مکمل، رفتار دینامیکی فشار و جریان مواد دانه‌ای را در فرآیند تخلیه از سیلوها و قیف‌های مخروطی بررسی کردند. آن‌ها با بهره‌گیری از روش اجزای محدود^۳ و رویکرد لاگرانژی-اویلری دلخواه^۴ در نرم‌افزار آباکوس^۵، فرآیند بارگیری و تخلیه را شبیه‌سازی و اثر پارامترهای مؤثر بر الگوی جریان و فشار دینامیکی دیواره را تحلیل نمودند. نتایج نشان داد که مدل عددی توسعه‌یافته قادر است توزیع فشار و رفتار جریان نیمه‌توده‌ای را با دقت بالا پیش‌بینی کند و نوسانات فشار در آغاز تخلیه با دو فرکانس غالب همراه است که به ترتیب ناشی از انتشار موج فشار و تشکیل متناوب نواحی لغزش هستند. همچنین، تحلیل پارامتری نشان داد زبری دیواره و سرعت تخلیه بیشترین تأثیر را بر رفتار دینامیکی مواد دارند و معیار پیشنهادی بر پایه نسبت سرعت، در شناسایی مرز کانال جریان با داده‌های تجربی هم‌خوانی دارد.

با وجود پیشرفت‌های چشمگیر در مدل‌سازی عددی، شبیه‌سازی پدیده‌های دارای تغییرشکل بزرگ و اندرکنش‌های پیچیده همچنان یکی از چالش‌های اصلی مهندسی است. برای رفع این محدودیت، کیو^۶ و همکاران [۵] کارایی رویکرد کوپل اویلری-لاگرانژی^۷ را به‌عنوان جایگزینی برای روش اجزای محدود کلاسیک بررسی کردند. آن‌ها با استفاده از نرم‌افزار آباکوس، مسائلی نظیر نصب شمع در خاک و برخورد کشتی با ساحل را شبیه‌سازی کردند. نتایج نشان داد این رویکرد با جلوگیری از اعوجاج شبکه، دقت بالایی در مقایسه با داده‌های تجربی و حل‌های تحلیلی دارد و برای تحلیل مسائل پیچیده با تغییرشکل بزرگ بسیار کارآمد است. لین^۸ و همکاران [۶] با استفاده از رویکرد کوپل اویلری-لاگرانژی، رفتار دینامیکی مواد دانه‌ای را در شرایط تغییرشکل بزرگ شبیه‌سازی کردند. تمرکز پژوهش بر فروپاشی ستون دانه‌ای و محاسبه نیروی ضربه ناشی از برخورد جریان با موانع صلب بود. مقایسه نتایج عددی و داده‌های آزمایشگاهی نشان داد که این رویکرد توانایی بالایی در پیش‌بینی مراحل کلیدی جریان، از جمله شکست پیش‌رونده و اندرکنش با موانع دارد.

ری^۹ و همکاران [۷] به بررسی ایمنی سازه یک غلاف ترموکوپل درون یک سیلوی آزمایشگاهی حین تخلیه مواد پرداختند. هدف پژوهش، جلوگیری از خرابی ناشی از فشار و نیروی کششی حاصل از جریان مواد بود. آن‌ها با استفاده از روش اجزای محدود و رویکرد کوپل اویلری-لاگرانژی، فرآیند تخلیه را شبیه‌سازی کرده و نیروهای وارده بر غلاف را محاسبه نمودند. مقایسه نتایج عددی با محاسبات تحلیلی بر پایه استاندارد طراحی یوروکد، دقت مدل عددی را در پیش‌بینی تنش‌های وارده بر دیواره و اجزای داخلی سیلو تأیید کرد.

در پژوهش‌های پیشین، تمرکز اصلی بر تحلیل رفتار مکانیکی مواد دانه‌ای، توزیع فشار، الگوی جریان و توسعه روش‌های عددی بوده است. اگرچه برخی از این مطالعات در بستر فرآیندهای دمای بالا انجام شده‌اند ولیکن اثر دما در مدل‌سازی عددی آن‌ها به‌طور مستقیم لحاظ نشده است و تحلیل‌ها عمدتاً بر رفتار مکانیکی سیستم متمرکز بوده‌اند. از این‌رو، بررسی هم‌زمان اثر دمای بهره‌برداری بر

¹ Boechat

² Wang

³ Finite Element Method (FEM)

⁴ Arbitrary Lagrangian-Eulerian (ALE)

⁵ Abaqus

⁶ Qiu

⁷ Coupled Eulerian-Lagrangian (CEL)

⁸ Lin

⁹ Rhee

پاسخ سازه‌ای اجزای داخلی، به‌ویژه غلاف ترموکوپل در کوره‌های احیای مستقیم، کمتر مورد توجه قرار گرفته است. با این حال، نتایج این پژوهش‌ها مبنای مناسبی برای توسعه مدل‌های پیشرفته‌تر فراهم کرده است. در پژوهش حاضر عمر غلاف ترموکوپل در شرایط کاری کوره احیای مستقیم با در نظر گرفتن خواص مکانیکی وابسته به دما تحت اثر هم‌زمان مکانیزم‌های خرابی پیش‌بینی شده است. در این راستا، محاسبات تحلیلی مبتنی بر استاندارد طراحی یوروکد و شبیه‌سازی عددی به روش کوپل اولیری-لاگرانژی ترکیب و تنش‌های وارد بر غلاف محاسبه گردیده است. سپس عمر غلاف بر اساس معیارهای تسلیم، خستگی^۱، خزش^۲ و معیار ترکیبی خستگی و خزش ارزیابی و نتایج مدل عددی با نتایج تحلیلی مقایسه شده است.

۲- تحلیل نظری و عددی

۱-۲- بیان مسئله و رویکرد پژوهش

غلاف‌های محافظ ترموکوپل در کوره‌های احیای مستقیم به‌دلیل دمای بالا و تماس مداوم با مواد دانه‌ای، در معرض خرابی زودهنگام قرار دارند. ترکیب بارهای حرارتی و مکانیکی، موجب ایجاد تنش‌های قابل توجه در دیواره غلاف‌ها می‌شود و تحلیل آن‌ها برای شناسایی مکانیزم‌های خرابی اهمیت دارد. برای درک بهتر موقعیت و هندسه غلاف مرکزی، نمای کلی آن درون کوره در شکل ۱ نشان داده شده است. در این پژوهش، ابتدا بارهای مکانیکی ناشی از فشار و جریان مواد دانه‌ای با استفاده از مدل‌های تحلیلی معتبر، شامل مدل جانسن و استاندارد طراحی یوروکد، محاسبه گردید. سپس، مدل عددی مبتنی بر رویکرد کوپل اولیری-لاگرانژی در نرم‌افزار آباکوس توسعه یافت تا جریان دینامیکی مواد دانه‌ای و توزیع فشار در امتداد محور مرکزی کوره، محل قرارگیری غلاف‌ها، با دقت شبیه‌سازی شود. در ادامه نتایج حاصل برای ارزیابی مکانیزم‌های خرابی و برآورد عمر غلاف در شرایط کاری کوره مورد استفاده قرار گرفت.

۲-۲- مبانی نظری و روش‌های تحلیلی

۱-۲-۲- رفتار و مفاهیم فشار در مواد دانه‌ای

تحلیل بارهای استاتیکی و دینامیکی وارد بر غلاف‌های ترموکوپل، که از تماس و حرکت توده گندله‌های سنگ‌آهن ناشی می‌شود، نیازمند درک دقیق رفتار مواد دانه‌ای است. به‌دلیل شباهت هندسی و رفتاری ستون مواد در کوره‌های احیای مستقیم با سیلوها، استفاده از مدل‌های تحلیلی توسعه‌یافته برای سیلوها رویکردی معتبر در تحلیل فشار محسوب می‌شود. مواد دانه‌ای از ذرات جامد مجزایی تشکیل شده‌اند که در مقیاس ماکروسکوپی رفتاری مشابه محیط‌های پیوسته دارند و بسته به شرایط بارگذاری، رفتارهایی شبیه به جامدات، مایعات یا گازها از خود بروز می‌دهند [۸].

تفاوت اصلی رفتار مواد دانه‌ای با سیالات در نحوه توزیع فشار در توده انباشته است. در سیالات، فشار طبق اصل هیدرواستاتیک با عمق رابطه‌ای خطی دارد، اما در مواد دانه‌ای بخشی از وزن توده از طریق اصطکاک به دیواره‌ها منتقل می‌شود. این پدیده، که به اثر جانسن^۳ معروف است و مبنای مدل‌های تحلیلی سیلوها محسوب می‌شود، سبب می‌گردد فشار قائم با افزایش عمق به مقدار ثابتی میل کند. این رفتار غیرخطی فشار، وجه تمایز اصلی مواد دانه‌ای از سیالات بوده و در شکل ۲-الف نشان داده شده است. علاوه بر فشار استاتیکی، الگوی حرکت مواد نیز در تحلیل تنش مؤثر است. دو الگوی اصلی جریان مواد، شامل جریان جرمی^۴ و جریان قیفی^۵، در شکل ۲-ب نشان داده شده‌اند. اگرچه جریان واقعی در کوره می‌تواند ترکیبی از هر دو باشد، در این پژوهش جریان از نوع جرمی در نظر گرفته شده است که در آن کل توده مواد به‌صورت یکپارچه حرکت می‌کند. این فرض از آن جهت اهمیت دارد که مدل‌های تحلیلی کلاسیک مانند مدل جانسن بر پایه جریان یکنواخت توسعه یافته‌اند و جریان جرمی شرایط لازم برای به‌کارگیری این روابط را فراهم می‌کند [۹ - ۱۱].

¹ Fatigue

² Creep

³ Janssen Effect

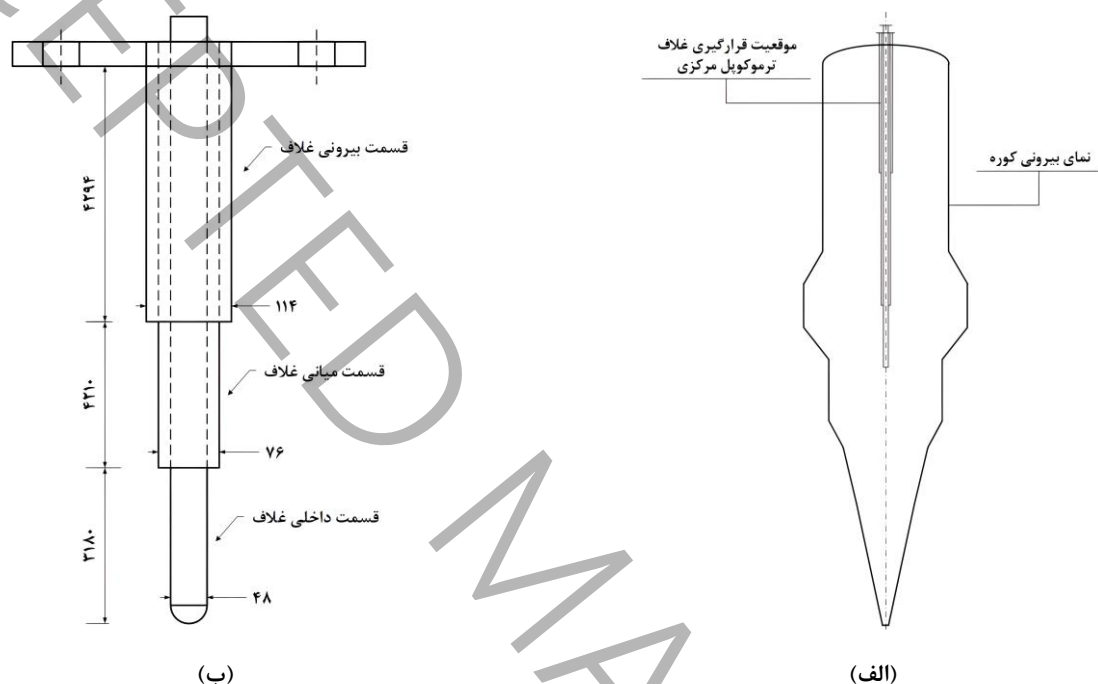
⁴ Mass Flow

⁵ Funnel Flow

یکی از مفاهیم پایه در تحلیل فشار مواد دانه‌ای، ارتباط میان فشار قائم و جانبی است. این دو مؤلفه به وسیله ضریب فشار جانبی به فشار قائم با یکدیگر مرتبط هستند که مطابق رابطه (۱) تعریف می‌شود [۱۱].

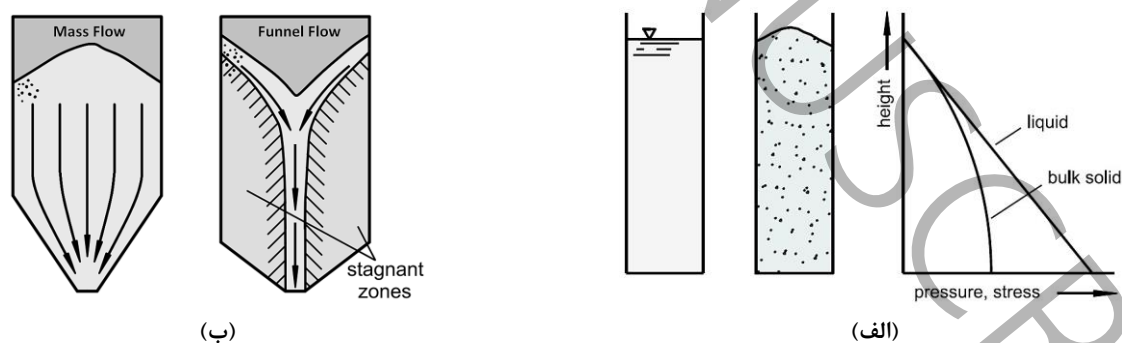
$$K = \frac{\sigma_h}{\sigma_v} \quad (1)$$

که در آن K ضریب فشار جانبی به فشار قائم، σ_h فشار جانبی و σ_v فشار قائم است. برای گندله سنگ آهن مقدار آن حدود ۰/۵۲ است [۱۰]. این ضریب مبنای مدل‌های کلاسیک تحلیل فشار از جمله مدل جانسن بوده و امکان تعیین توزیع فشار در ستون مواد را فراهم می‌کند.



شکل ۱: الف) موقعیت قرارگیری غلاف ترموکوپل مرکزی درون کوره ب) شکل هندسی غلاف ترموکوپل (تمام ابعاد بر حسب میلی‌متر می‌باشند).

Fig. 1. (a) Position of the central thermocouple protection tube inside the furnace (b) Geometry of the thermocouple protection tube (all dimensions are in millimeters).

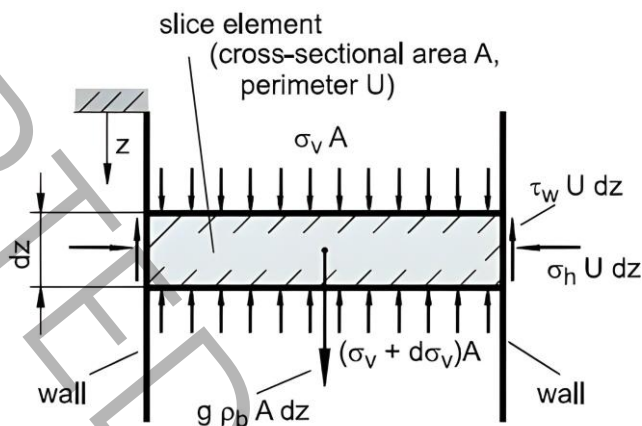


شکل ۲: الف) نحوه تغییرات فشار در راستای عمق سیلو برای مایعات و مواد دانه‌ای ب) نحوه حرکت مواد دانه‌ای در سیلو [۹].

Fig. 2. (a) Pressure variation along the depth of the silo for liquids and granular materials (b) Flow regimes for the granular materials in the silo [9].

۲-۲-۲- تحلیل فشار براساس مدل کلاسیک جانسن

مدل کلاسیک جانسن از نخستین و درعین حال پرکاربردترین مدل‌های تحلیلی برای پیش‌بینی توزیع فشار در توده‌های مواد دانه‌ای است. این مدل با فرض تعادل نیرو در یک جزء استوانه‌ای از ماده درون سیلو توسعه یافته و مبنای استانداردهای طراحی مدرن، از جمله استاندارد طراحی یوروکد، محسوب می‌شود. در این مدل فرض می‌شود مواد دانه‌ای در حالت تعادل استاتیکی قرار دارند و نیروهای وارد بر یک مقطع افقی در عمق مشخص z ، شامل وزن مواد بالادست، تنش‌های قائم و جانبی و نیروی اصطکاک بین مواد و دیواره است. توزیع و جهت این نیروها به صورت شماتیک در شکل ۳ نشان داده شده است [۹ و ۱۱].



شکل ۳: نیروهای وارده بر یک جزء دلخواه از مواد دانه‌ای درون قسمت عمودی سیلو در عمق z [۹].

Fig. 3. Forces acting on an arbitrary element of granular materials inside the vertical section of the silo at a depth of z [9].

با در نظر گرفتن تعادل نیروها در راستای قائم، رابطه (۲) حاصل می‌شود [۱۱].

$$\frac{d\sigma_v}{dz} + \sigma_v K \frac{U}{A} \tan \phi_x = \rho_b g \quad (2)$$

در این رابطه، ρ_b چگالی توده‌ای ماده، g شتاب گرانشی، K ضریب نسبت فشار جانبی به فشار قائم، A مساحت مقطع داخلی، U محیط داخلی سیلو و ϕ_x زاویه اصطکاک بین دیواره و مواد دانه‌ای است. با حل رابطه (۲)، توزیع تنش قائم در عمق z به صورت رابطه (۳) قابل بیان است [۱۱].

$$\sigma_v(z) = \frac{\rho_b g A}{K U \tan \phi_x} \left(1 - e^{-\frac{K U \tan \phi_x}{A} z} \right) \quad (3)$$

رابطه (۳) حاکی از آن است که بر اساس مدل جانسن، در مواد دانه‌ای فشار قائم ابتدا نمایی افزایش یافته و سپس در عمق‌های بیشتر به یک مقدار حدی ثابت میل می‌کند. این رفتار به دلیل انتقال بخشی از بار قائم به دیواره‌ها از طریق اصطکاک است [۱۱]. فشار جانبی دیواره نیز از رابطه (۴) محاسبه می‌شود [۱۱].

$$\sigma_h(z) = K \sigma_v(z) \quad (4)$$

بر اساس رابطه (۴)، فشار جانبی در هر عمق متناسب با فشار قائم است و ضریب K نسبت میان این دو مؤلفه را تعیین می‌کند.

۲-۲-۳- تحلیل فشار براساس استاندارد طراحی یوروکد

استاندارد طراحی یوروکد به عنوان مرجع اصلی طراحی سازه‌های حاوی مواد دانه‌ای، نسخه‌ای اصلاح شده از مدل جانسن را ارائه می‌دهد که اثر هندسه، اصطکاک و چگالی مواد را به طور هم‌زمان در نظر می‌گیرد. این استاندارد برای سازه‌هایی مانند سیلوها و کوره‌های احیای مستقیم کاربرد دارد و در تحلیل حاضر نیز به دلیل تطابق ابعاد کوره با محدوده مجاز آن به کار گرفته شده است. پارامترهای هندسی اصلی بر اساس نمادگذاری استاندارد مذکور در شکل ۴-الف نشان داده شده‌اند [۱۰].

در این مدل، توزیع فشار بر اساس سه پارامتر کلیدی تعریف می‌شود: عمق مشخصه (z_0)، فشار جانبی مشخصه (p_{h0}) و تابع توزیع فشار (Y_f) که به ترتیب با استفاده از روابط (۵) تا (۷) محاسبه می‌شوند [۱۰].

$$Y_f(z) = 1 - e^{-\frac{z}{z_0}} \quad (۵)$$

$$p_{h0} = \gamma K z_0 \quad (۶)$$

$$z_0 = \frac{1}{K \mu U} A \quad (۷)$$

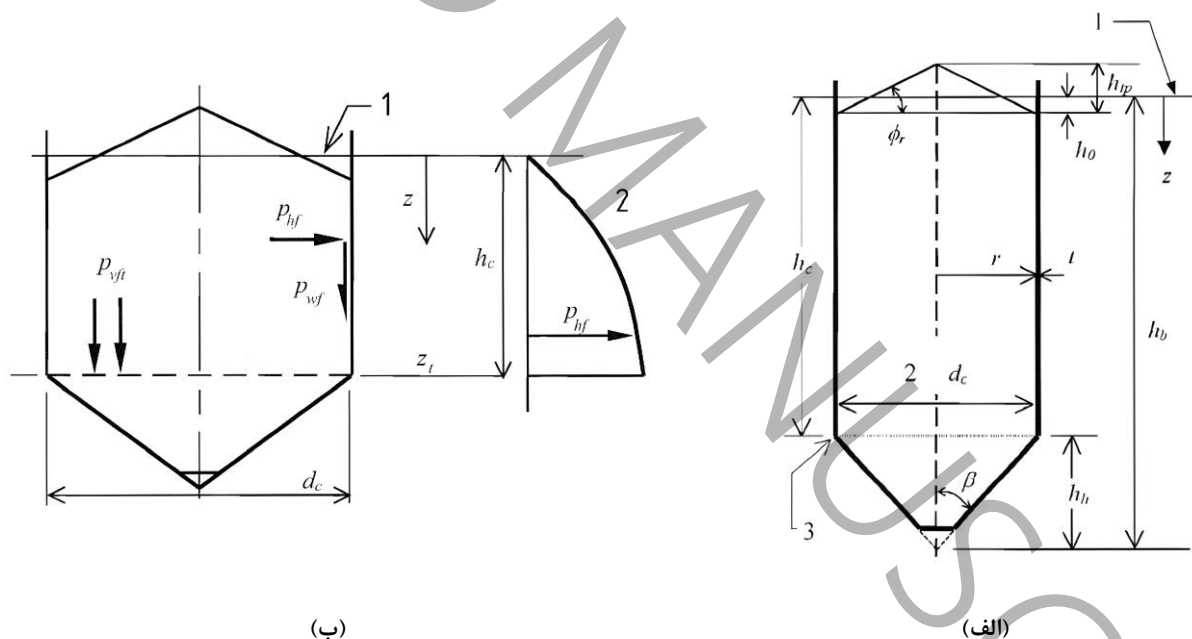
با استفاده از این پارامترها، فشار جانبی (p_{hf})، فشار قائم (p_{vf}) و تنش برشی دیواره (p_{wff}) در عمق z از سطح آزاد ماده طبق روابط (۸) تا (۱۰) تعیین می‌شوند. اندیس f معرف کمیت‌های متناظر با فرآیند بارگیری سیلو است [۱۰].

$$p_{hf}(z) = p_{h0} Y_f(z) \quad (۸)$$

$$p_{vf}(z) = \frac{p_{h0}}{K} Y_f(z) \quad (۹)$$

$$p_{wff}(z) = \mu p_{h0} Y_f(z) \quad (۱۰)$$

در روابط فوق، γ چگالی توده‌ای ماده^۱ و μ ضریب اصطکاک بین دیواره و مواد دانه‌ای می‌باشد. مؤلفه‌های تنش وارده به دیواره سیلو در شکل ۴-ب نمایش داده شده است.



شکل ۴: الف) نشان‌گذاری پارامترهای هندسی سیلو مطابق استاندارد طراحی یورو ب) نشان‌گذاری تنش‌های وارده بر بخش عمودی سیلو [۱۰].

Fig. 4. (a) Notation of the geometrical parameters of the silo according to the Eurocode design standard (b) Notation of the stresses acting on the vertical section of the silo [10].

¹ Bulk Density

در استاندارد طراحی یوروکد، به منظور در نظر گرفتن شرایط بارگذاری بحرانی، ضرایب اصلاحی مطابق روابط (۱۱) و (۱۲) اعمال می‌شوند تا مقادیر بیشینه و کمینه برای ضریب نسبت فشار جانبی به فشار قائم و ضریب اصطکاک دیواره محاسبه شوند [۱۰].

$$K_{\max} = a_K K_m, K_{\min} = \frac{K_m}{a_K} \quad (11)$$

$$\mu_{\max} = a_\mu \mu_m, \mu_{\min} = \frac{\mu_m}{a_\mu} \quad (12)$$

که در آن، K_m و μ_m مقادیر میانگین ضریب فشار جانبی به فشار قائم و ضریب اصطکاک دیواره، a_K و a_μ ضرایب اصلاحی استاندارد و $K_{\max/\min}$ و $\mu_{\max/\min}$ مقادیر بیشینه و کمینه برای نسبت فشار و ضریب اصطکاک هستند. مقادیر پارامترهای مورد استفاده در روابط فوق برای کوره مورد مطالعه در جدول ۱ ارائه شده است [۱۰].

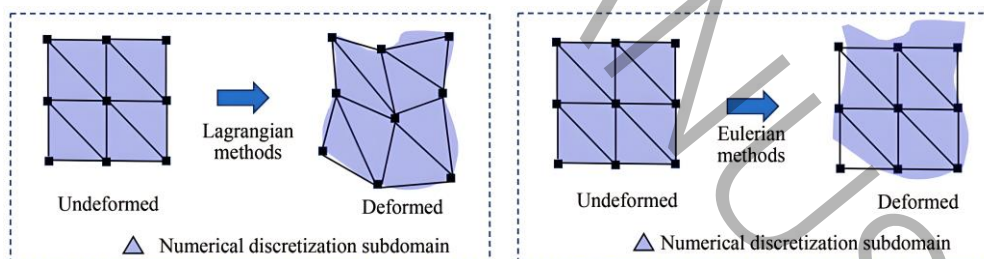
جدول ۱: مقادیر پارامترهای مورد استفاده برای کوره مورد مطالعه [۱۰].

Table 1. Values of the parameters used for the studied furnace [10].

U(m)	A(m ²)	μ_m	K_m	$\gamma(\text{kN/m}^3)$	پارامتر
۱۷/۷۵	۲۵/۰۷۲	۰/۵۴	۰/۵۲	۲۲	مقدار
-	-	۱/۱۲	۱/۱۵	-	ضریب اصلاحی

۳- شبیه‌سازی مسئله به کمک روش اجزای محدود

روش اجزای محدود بر پایه دو دیدگاه اصلی لاگرانژی^۱ و اویلری^۲ توسعه یافته که تفاوت آن‌ها در شکل ۵ نشان داده شده است. در دیدگاه لاگرانژی شبکه همراه ماده حرکت کرده و در تغییرشکل‌های بزرگ دچار اعوجاج می‌شود، در حالی که در دیدگاه اویلری شبکه ثابت است و ماده از درون آن عبور می‌کند اما پیگیری دقیق تاریخچه تنش و کرنش ممکن نیست. برای رفع این محدودیت‌ها، رویکرد کوپل اویلری-لاگرانژی توسعه یافت که امکان شبیه‌سازی هم‌زمان تغییرشکل‌های بزرگ و تماس‌های چندگانه را فراهم می‌کند [۱۲ و ۱۳].



شکل ۵: تفاوت دیدگاه لاگرانژی و اویلری [۱۴].

Fig. 5. Difference between Lagrangian and Eulerian approaches [14].

تحلیل جریان مواد دانه‌ای در کوره‌های احیای مستقیم به دلیل تماس مکرر ذرات، تغییرشکل‌های بزرگ و انتقال پیچیده نیرو به دیواره از مسائل دشوار عددی به شمار می‌آید به همین دلیل در این پژوهش، روش کوپل اویلری-لاگرانژی به دلیل قابلیت مدل‌سازی هم‌زمان جریان مواد دانه‌ای و اجسام صلب [۶ و ۷]، انتخاب شد. در این روش، مواد دانه‌ای با دیدگاه اویلری و دیواره صلب کوره با دیدگاه لاگرانژی مدل می‌شود که از اعوجاج شبکه جلوگیری می‌کند و پایداری تحلیل را بهبود می‌بخشد. در مقایسه با روش اجزای گسسته

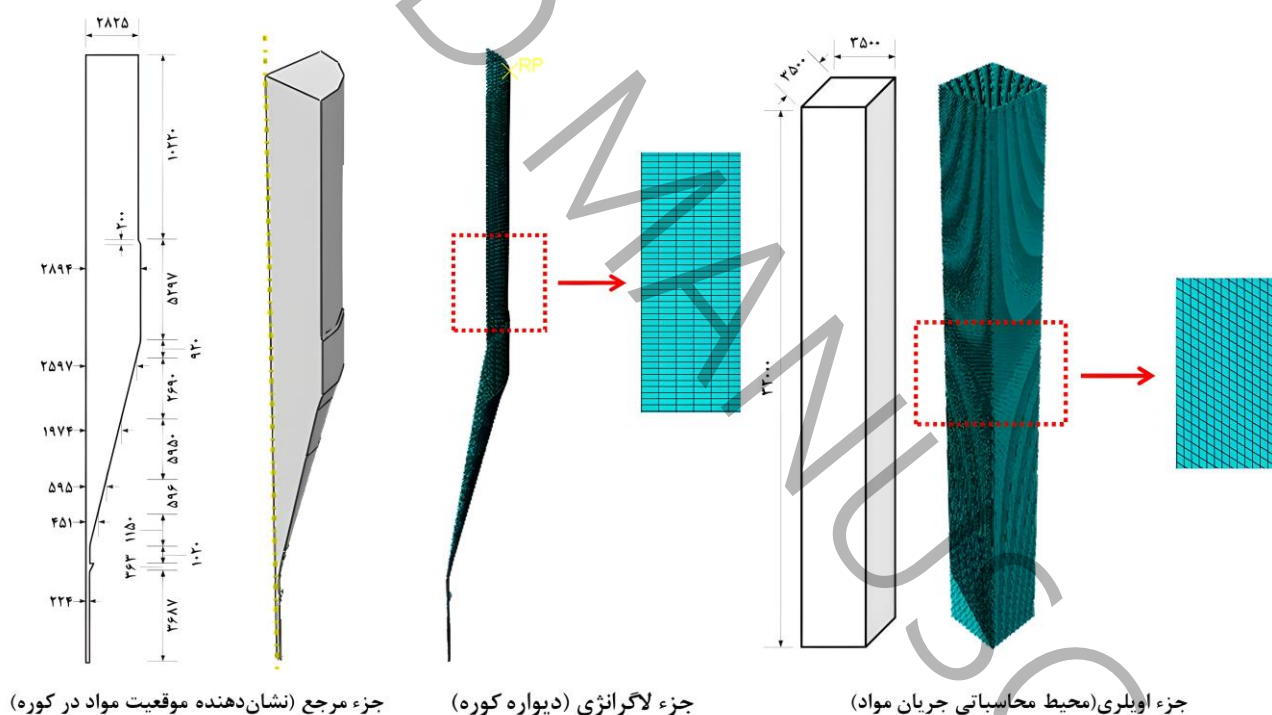
¹ Lagrangian approach

² Eulerian approach

که در مقیاس‌های بزرگ به دلیل رهگیری ذرات متعدد از هزینه محاسباتی بالایی برخوردار است [۲]، این روش امکان تحلیل پیوسته و کارآمد جریان مواد را فراهم می‌کند [۶ و ۷]. همچنین، برخلاف روش‌های مبتنی بر دیدگاه لاگرانژی که در تغییرشکل‌های بزرگ با اعوجاج شبکه و نیاز به شبکه‌بندی مجدد مواجه می‌شوند [۳ و ۴]، پایداری عددی مناسب‌تری ارائه می‌دهد. از این رو، روش مذکور برای شبیه‌سازی جریان مواد دانه‌ای در مقیاس کوره احیای مستقیم مناسب تشخیص داده شد. همچنین، به منظور کاهش حجم محاسبات، از تقارن هندسی مدل استفاده شد و برخی جزئیات داخلی کوره که تأثیر مستقیمی بر بارهای وارد بر غلاف ترموکوپل نداشتند، حذف گردید. با این حال، هندسه اصلی، شرایط مرزی و خواص مکانیکی مواد مطابق شرایط واقعی بهره‌برداری تعریف شدند.

۳-۱- مدل‌سازی جریان مواد دانه‌ای و فشار وارد بر غلاف

برای شبیه‌سازی جریان مواد دانه‌ای در کوره احیای مستقیم با روش کوپل اویلری-لاگرانژی، سه جزء اصلی در نرم‌افزار آباکوس تعریف شد. جزء مرجع موقعیت اولیه مواد را در شبکه اویلری تعیین می‌کند و تنها برای مقداردهی کسر حجمی^۱ به کار می‌رود، از این رو پس از تعیین موقعیت اولیه مواد در جزء اویلری از تحلیل خارج می‌شود. جزء اویلری فضای محاسباتی جریان مواد را تشکیل داده و با استفاده از المان‌های مکعبی هشت‌گره‌ای، امکان شبیه‌سازی تغییرشکل‌های بزرگ را بدون اعوجاج شبکه فراهم می‌کند. جزء لاگرانژی جهت مدل‌سازی دیواره کوره به صورت پوسته صلب با المان‌های چهارگره‌ای به کار گرفته می‌شود. در ضمن ابعاد آن به گونه‌ای انتخاب می‌گردد که با جزء مرجع تطابق داشته باشد و تماس میان اجزاء به درستی برقرار شود. شکل ۶ ابعاد و نحوه شبکه‌بندی اجزاء مدل شامل بخش‌های مرجع، اویلری و لاگرانژی را نشان می‌دهد و مشخصات شبکه‌بندی اجزاء نیز در جدول ۲ آمده است.



شکل ۶: شماتیک ابعاد و نحوه شبکه‌بندی هر یک از اجزاء مدل (تمام ابعاد بر حسب میلی‌متر می‌باشند).

Fig. 6. Schematic of the dimensions and meshing of each model component (all dimensions are in millimeters)

¹ Volume Fraction

جدول ۲: مشخصات شبکه‌بندی هر یک از اجزاء مدل.

Table 2. Meshing specifications of each model component.

نوع المان	تعداد المان	تعداد گره	جزء
-	-	-	مرجع
EC3D8R	۹۴۱۰۳۴	۹۸۳۸۰۸	اویلری
R3D4	۷۱۵۸۰	۷۲۸۳۴	لاگرانژی

در روش کوپل اویلری-لاگرانژی، تنها جزء اویلری به‌عنوان محیط محاسباتی جریان مواد نیازمند تعریف خواص مکانیکی است. برای مدل‌سازی رفتار گندله‌های سنگ‌آهن در این جزء، از معیار پلاستیک کولمب-موهر^۱ استفاده گردید. این معیار رفتار برشی مواد دانه‌ای را بر اساس اصطکاک داخلی توصیف می‌کند و پارامترهای اصلی آن شامل زاویه اصطکاک داخلی^۲ و زاویه انبساط^۳ هستند. به‌کارگیری این مدل در چارچوب محیط پیوسته، امکان شبیه‌سازی تسلیم و جریان مواد دانه‌ای را بدون مدل‌سازی مجزای ذرات فراهم کرده و نسبت به روش‌های گسسته هزینه محاسباتی کمتری دارد. در مدل حاضر، نیروهای بین‌ذره‌ای ناچیز فرض شده و برای انطباق بهتر با رفتار واقعی مواد، چسبندگی^۴ در معیار کولمب-موهر نزدیک به صفر در نظر گرفته شد تا از بروز رفتار چسبنده غیرواقعی جلوگیری شود. مقادیر پارامترهای مکانیکی مورد استفاده در جدول ۳ آورده شده است [۱۵].

پس از تعریف هندسه و خواص مکانیکی، فرآیند مونتاژ اجزاء مرجع، اویلری و لاگرانژی بر اساس موقعیت نسبی دقیق آن‌ها همانند شکل ۷ انجام می‌شود.

جدول ۳: خواص مکانیکی جزء اویلری (گندله سنگ آهن) [۱۵].

Table 3. Mechanical properties of the Eulerian component (iron ore pellet) [15].

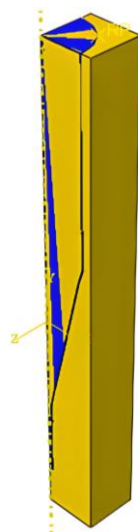
جزء	ماده دانه‌ای	چگالی ($\frac{Kg}{m^3}$)	مدول یانگ (MPa)	نسبت پواسون	زاویه اصطکاک داخلی (deg)	زاویه انبساط (deg)
اویلری	گندله سنگ آهن	۲۳۰۰	۲/۴	۰/۴	۳۵/۹۶	۲

¹ Mohr-Coulomb Plasticity

² Internal friction angle

³ Dilatancy angle

⁴ Cohesion



شکل ۷: شماتیک مدل مونتاژ شده.

Fig. 7. Schematic of the assembled model.

در رویکرد کوپل اوپلری-لاگرانژی، تحلیل مسئله با استفاده از حلگر دینامیکی صریح^۱ انجام می‌شود که تنها گزینه معتبر برای این روش است. این حلگر به دلیل توانایی در مدیریت تغییر شکل‌های بزرگ و تماس‌های چندگانه، برای شبیه‌سازی جریان مواد دانه‌ای مناسب است. برای جلوگیری از نفوذ مواد به دیواره کوره و حفظ پایداری عددی، بیشینه گام زمانی^۲ برابر 0.001 ثانیه در نظر گرفته شد تا نرم‌افزار با تنظیم خودکار گام‌های کوچک‌تر، دقت محاسبات را تضمین کند. تماس میان مواد و دیواره با الگوریتم تماس عمومی^۳ مدل‌سازی شد که مطابق توصیه آباکوس، برای روش اوپلری-لاگرانژی مناسب است. رفتار مماسی تماس‌ها به روش جریمه^۴ تعریف گردید و ضریب اصطکاک بین مواد دانه‌ای و دیواره کوره برابر 0.48 لحاظ شد. برای جلوگیری از نفوذ مواد، رفتار عمودی تماس‌ها به صورت تماس سخت^۵ تعریف گردید تا اندرکنش مواد و دیواره با دقت بیشتری شبیه‌سازی شود. در این شبیه‌سازی، تنها نیروی مؤثر، نیروی گرانش در راستای عمودی کوره می‌باشد. برای کاهش حجم محاسبات، با بهره‌گیری از تقارن هندسی مدل، شرایط مرزی تقارن^۶ بر سطوح جانبی جزء اوپلری اعمال می‌گردد. همچنین، در سطوح بالایی و پایینی کوره به ترتیب شرایط مرزی اوپلری^۷ ورود آزاد^۸ و خروج آزاد^۹ تعریف تا رفتار واقعی بارگیری و تخلیه مواد به صورت هم‌زمان شبیه‌سازی شود. دیواره کوره نیز به عنوان جسم صلب با قید انکستر^{۱۰} در تمامی جهات ثابت نگه داشته شد تا از هرگونه جابجایی یا تغییر مکان آن جلوگیری شود.

۳-۲- تحلیل خزش غلاف ترموکوپل

بر اساس نتایج بدست آمده در بخش قبلی، بیشترین مقدار تنش در بخش داخلی غلاف ترموکوپل ایجاد می‌شود. از این رو، شبیه‌سازی خزش برای این ناحیه به صورت دوبعدی و متقارن محوری انجام شد تا رفتار وابسته به زمان ماده در دمای کاری کوره بررسی گردد.

¹ Dynamic Explicit

² Time Increment

³ General Contact

⁴ Penalty

⁵ Hard Contact

⁶ Symmetry Boundary Conditions

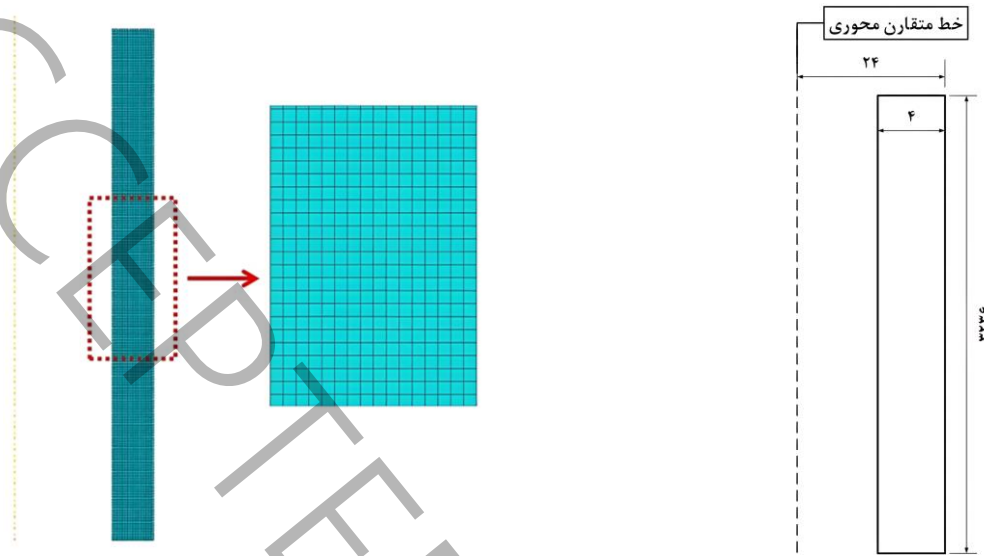
⁷ Eulerian Boundary Conditions

⁸ Free InFlow

⁹ Free OutFlow

¹⁰ Encastre

مدل با المان‌های چهارگره‌ای شبکه‌بندی شد که مشخصات آن در جدول ۴ آمده است. ابعاد و نحوه شبکه‌بندی مدل در شکل ۸ نشان داده شده است.



شکل ۸ : شماتیک ابعاد و نحوه شبکه‌بندی غلاف ترموکوپل (تمام ابعاد بر حسب میلی‌متر می‌باشند).

Fig. 8. Schematic of the dimensions and meshing of the thermocouple protection tube (all dimensions are in millimeters).

جدول ۴ : مشخصات شبکه‌بندی غلاف ترموکوپل.

Table 4. Meshing specifications of the thermocouple protection tube.

نوع المان	تعداد المان	تعداد گره	جزء
CAX4R	۲۰۷۱۰۴	۲۲۰۰۶۵	غلاف ترموکوپل

غلاف ترموکوپل از آلیاژ اینکولوی ۸۰۰ ساخته شده است که دارای مقاومت حرارتی و پایداری مکانیکی بالا در دمای کاری کوره است. خواص مکانیکی ماده شامل چگالی، مدول یانگ، نسبت پواسون و ضریب انبساط حرارتی در جدول ۵ آمده است [۱۶]. رفتار خزشی ماده با مدل قانون توانی^۲ توصیف شد که در آن نرخ کرنش خزشی، مطابق رابطه (۱۳)، تابعی از تنش و زمان است. ضرایب تجربی مدل شامل A ، n و m وابسته به دما بوده و مقادیر آنها بر اساس نتایج آزمون‌های خزش در دمای ۸۰۰ درجه سانتیگراد از منابع [۱۷ و ۱۸] استخراج و در جدول ۵ ارائه گردیده است.

$$\dot{\epsilon}_{cr} = A\sigma^n t^m \quad (13)$$

جدول ۵ : خواص مکانیکی و خزشی آلیاژ اینکولوی ۸۰۰ در دمای ۸۰۰ درجه سانتیگراد [۱۶-۱۸].

Table 5. Mechanical and creep properties of Incoloy 800 alloy at 800 °C [16-18].

چگالی	مدول یانگ	نسبت پواسون	ضریب انبساط حرارتی	A	n	m
($\frac{Kg}{m^3}$)	(GPa)		($\frac{1}{^\circ C}$)	($\frac{m}{Kg}$)		
۷۹۴۰	۱۴۱/۴	۰/۳۹۴	$1/8 \times 10^{-5}$	10^{-57}	۶/۴۰۱۱	.

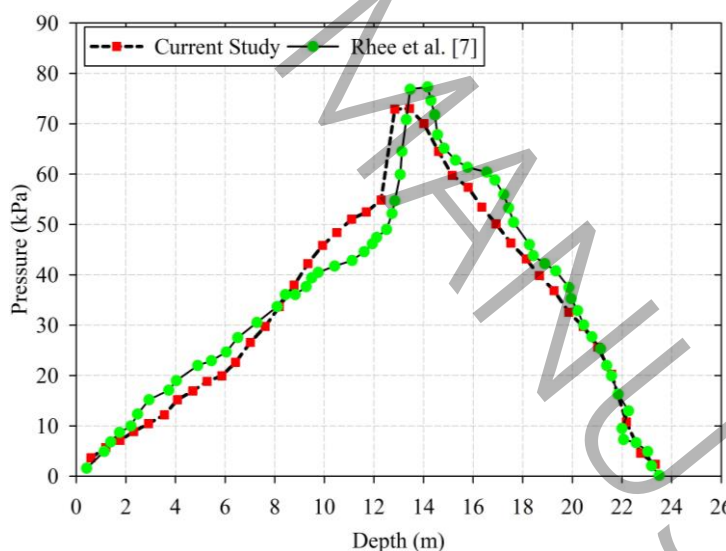
¹ Incoloy 800

² Power Law Model

برای انجام تحلیل خزش، فرآیند شبیه‌سازی در قالب دو گام متوالی انجام شد. در گام نخست، با استفاده از حلگر استاتیکی عمومی^۱، تعادل اولیه مدل برقرار گردید و در گام دوم، حلگر ویسکوز^۲ برای شبیه‌سازی تغییرشکل‌های وابسته به زمان در دمای ۸۰۰ درجه سانتیگراد به کار رفت. این فرآیند امکان بررسی دقیق رفتار خزشی و توزیع تنش در بازه‌های زمانی طولانی را فراهم کرد. بارهای وارد بر غلاف بر اساس نتایج به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی جریان مواد دانه‌ای در مرحله پیشین تعیین شدند. این بارها شامل نیروی کششی در راستای محوری غلاف و فشار جانبی وارد بر سطح بیرونی آن هستند. برای اعمال شرایط مرزی مدل، در لبه داخلی غلاف شرط تقارن محوری^۳ در نظر گرفته شد. همچنین، در لبه بالایی غلاف شرط تقارن هندسی^۴ اعمال گردید تا تغییرشکل مدل در راستای محوری به‌درستی کنترل شود. این تنظیمات شرایط واقعی عملکرد غلاف درون کوره را شبیه‌سازی کرده و پایداری مدل را در طول تحلیل حفظ می‌کنند.

۳-۳- صحت‌سنجی مدل عددی

به‌منظور اطمینان از صحت مدل عددی مورد استفاده، مطالعه مرجع [۷] که در آن جریان مواد دانه‌ای در یک سیلو با دیواره صلب با استفاده از روش اجزای محدود و رویکرد کوپل اویلری-لاگرانژی شبیه‌سازی شده، مبنای مقایسه قرار گرفت. در این پژوهش، مدل عددی حاضر تحت شرایط مشابه مرجع [۷] بازسازی و با همان خواص مکانیکی و شرایط مرزی تحلیل شد تا صحت عملکرد مدل در شبیه‌سازی تنش‌های ناشی از تماس مواد دانه‌ای و نیروی کششی محوری مورد ارزیابی قرار گیرد. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که بیشینه نیروی کششی محاسبه‌شده برای غلاف ترموکوپل در مدل عددی پژوهش حاضر برابر با ۴۲ کیلو نیوتن است که حدود ۱۰ درصد با مقدار گزارش‌شده در مرجع مذکور ۳۸ کیلو نیوتن اختلاف دارد. همچنین، شکل ۹ بیانگر تطابق مناسب روند تغییرات فشار دیواره در امتداد عمق بین پژوهش حاضر و مرجع [۷] است.



شکل ۹: مقایسه فشار وارده بر دیواره سیلو از پژوهش حاضر با نتایج مرجع [۷].

Fig. 9. Comparison of the pressure acting on the silo wall from the current study with the results given in reference [7].

¹ General Static

² Viscous

³ YASYMM

⁴ YSYMM

۴- نتایج و بحث

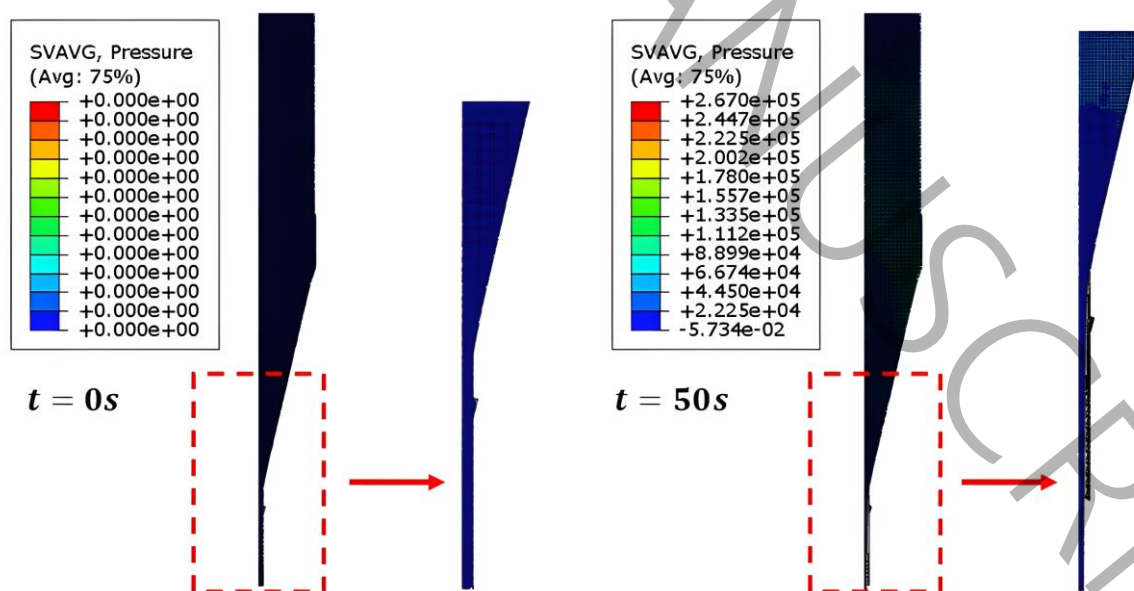
پس از اعتبارسنجی مدل عددی و اطمینان از دقت آن در شبیه‌سازی رفتار مکانیکی مواد دانه‌ای، در این بخش نتایج عددی و تحلیلی مورد مقایسه قرار می‌گیرد. ابتدا توزیع فشار و تنش در کوره، به‌ویژه در ناحیه غلاف ترموکوپل، تحلیل می‌شود. سپس رفتار خزشی غلاف در دمای کاری کوره بررسی و مکانیزم‌های خرابی شامل تسلیم، خستگی، خزش و ترکیب خستگی و خزش ارزیابی می‌گردند تا عمر کاری و مکانیزم غالب خرابی تعیین شود. در پایان نیز، راهکارهای طراحی برای افزایش دوام و بهبود عمر غلاف پیشنهاد می‌شود.

۴-۱- مقایسه نتایج تحلیلی و عددی فشار و تنش‌های وارده به غلاف

هدف این بخش، تحلیل فشار ناشی از حرکت مواد دانه‌ای درون کوره و بررسی اثر آن بر نیروی کششی و تنش‌های محوری وارده بر غلاف ترموکوپل است. بدین منظور، نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی به روش کوپل اویلری-لاگرانژی با محاسبات تحلیلی مبتنی بر استاندارد طراحی یورو مقایسه شده‌اند. برای ایجاد شرایط قابل مقایسه میان دو مدل، فشار به‌دست‌آمده از روابط تحلیلی که مربوط به حالت بارگیری کوره است، با استفاده از ضریب اصلاحی رابطه (۱۴) به فشار معادل در حالت تخلیه تبدیل شد. بدین ترتیب، مقایسه مستقیم میان نتایج تحلیلی و عددی امکان‌پذیر گردید.

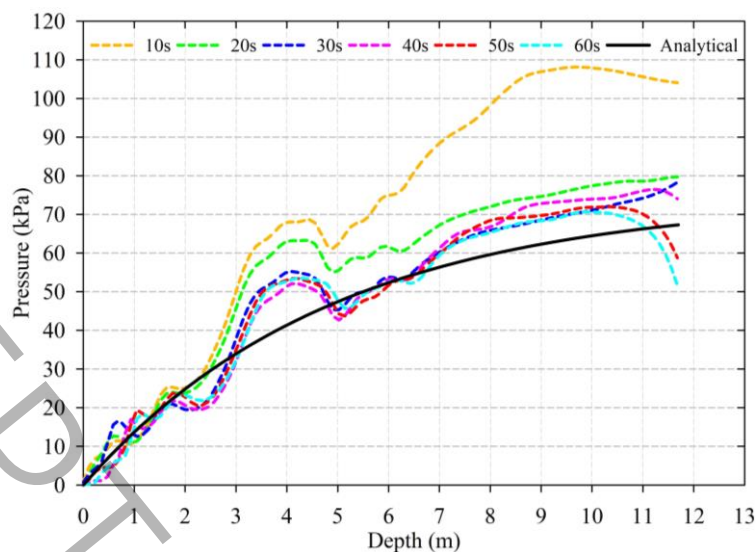
$$P_{he} = 1.15 \times P_{hf} \quad (14)$$

که در آن P_{he} فشار معادل در حالت تخلیه و P_{hf} فشار حاصل از روابط تحلیلی در حالت بارگیری کوره است. برای درک بهتر روند تحلیل و فرآیند تخلیه، شکل ۱۰ نمایی از مدل را در زمان آغاز تحلیل و پس از پایا شدن سیستم نشان می‌دهد. در این شکل، بخش کیفی‌شکل پایین کوره بزرگ‌نمایی شده تا ناحیه تخلیه و مسیر خروج مواد به‌وضوح مشخص باشد. در این بخش، شبیه‌سازی عددی به‌گونه‌ای انجام شد که فرآیند هم‌زمان بارگیری و تخلیه مواد دانه‌ای و رفتار واقعی جریان بازسازی شود. بررسی نتایج در بازه‌های زمانی مختلف نشان داد که پس از حدود ۵۰ ثانیه، نوسانات فشار کاهش یافته و سیستم به حالت پایا می‌رسد. شکل ۱۱ تغییرات فشار جانبی در راستای محور مرکزی کوره را در طول تحلیل نشان می‌دهد. پس از پایا شدن جریان، مقادیر فشار عددی و تحلیلی تطابق خوبی داشتند که بیانگر دقت مدل عددی در شبیه‌سازی رفتار واقعی جریان مواد دانه‌ای است.



شکل ۱۰: توزیع فشار درون کوره در دو بازه زمانی آغاز تحلیل و زمان پایا شدن سیستم و نمایش بزرگ‌نمایی از ناحیه کیفی‌شکل پایین کوره.

Fig. 10. Pressure distribution inside the furnace at two time steps: the beginning of the analysis and the steady-state time of the system, and a magnified view of the funnel-shaped region at the bottom of the furnace.



شکل ۱۱: تغییرات فشار جانبی در راستای محور مرکزی کوره بر حسب عمق طی فرآیند تخلیه و مقایسه نتایج با روابط تحلیلی.

Fig. 11. Lateral pressure variation along the central axis of the furnace versus depth during the discharge process, and comparison of the results with analytical prediction.

نیروها و تنش‌های محوری وارد بر غلاف ترموکوپل بر اساس توزیع فشار جانبی حاصل از شبیه‌سازی عددی محاسبه شد. بدین منظور از روابط (۱۵) تا (۱۷) جهت محاسبه نیروی محوری و تنش متناظر در هر بخش غلاف استفاده گردید و اثر تماس و اصطکاک میان مواد دانه‌ای و دیواره در محاسبات لحاظ شد. مقادیر به‌دست‌آمده با نتایج تحلیلی مبتنی بر استاندارد طراحی یوروکد مقایسه شده‌اند که در جدول ۶ ارائه شده است. بر اساس نتایج، اختلاف میان مقادیر عددی و تحلیلی در سه بخش غلاف کمتر از ۵ درصد بوده و بیشینه تنش محوری در بخش داخلی غلاف ایجاد می‌شود. این تطابق نشان می‌دهد مدل عددی به‌درستی توانسته است اثرات مکانیکی تماس مواد دانه‌ای با غلاف را شبیه‌سازی کرده و پیش‌بینی دقیقی از رفتار واقعی سیستم ارائه دهد.

$$F_f = \mu \times \int_0^L P(x) dx \times 2\pi r \quad (15)$$

$$\sigma_a = \frac{F_f}{A_{net}} \quad (16)$$

$$A_{net} = \pi(r_o^2 - r_i^2) \quad (17)$$

در روابط (۱۵) تا (۱۷)، F_f نیروی محوری وارد بر غلاف، $P(x)$ توزیع فشار در راستای عمق کوره، r شعاع خارجی غلاف، μ ضریب اصطکاک بین مواد دانه‌ای و سطح غلاف، σ_a تنش محوری و A_{net} سطح مقطع مؤثر غلاف است.

جدول ۶: مقایسه تنش محوری در بخش‌های مختلف غلاف ترموکوپل.

Table 6. Comparison of axial stress at different sections of the thermocouple protection tube.

بخش غلاف	روش تحلیلی (MPa)	روش عددی (MPa)	اختلاف نسبی (%)
بیرونی	۱۰/۸۷	۱۰/۳۸	۳/۷۹
میانی	۲۷/۷۱	۲۶/۸۳	۳/۱۸
داخلی	۲۹/۳۲	۲۹/۶۴	۱/۰۹

۲-۴- تحلیل مکانیزم‌های خرابی غلاف

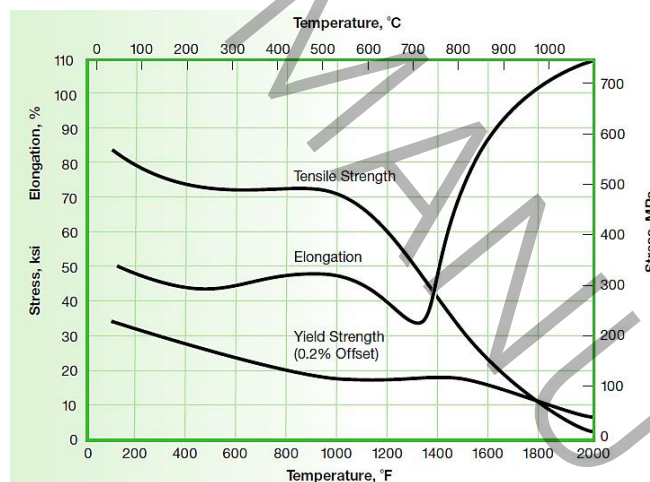
برای ارزیابی رفتار مکانیکی و شناسایی عامل اصلی خرابی، مکانیزم‌های مختلف خرابی مورد بررسی قرار گرفتند. چهار مکانیزم اصلی شامل تسلیم، خستگی، خزش و ترکیب خستگی و خزش در دمای کاری کوره به صورت تحلیلی ارزیابی شدند. در این ارزیابی، عمر کاری غلاف بر اساس هر مکانیزم محاسبه و مکانیزم غالب خرابی تعیین گردید تا مبنایی برای تحلیل‌های عددی بعدی فراهم شود.

۲-۴-۱- تحلیل خرابی بر اساس معیار تسلیم

یکی از معیارهای اصلی ارزیابی خرابی در سازه‌های فلزی، معیار تسلیم است. بر اساس این معیار، هنگامی که تنش اعمالی از حد تسلیم ماده در دمای کاری فراتر رود، تغییر شکل پلاستیک و در نهایت شکست رخ می‌دهد. برای بررسی احتمال تسلیم در غلاف ترموکوپل، بیشینه تنش محوری حاصل از محاسبات تحلیلی با تنش تسلیم آلیاژ اینکولوی ۸۰۰ در دمای ۸۰۰ درجه سانتیگراد مقایسه شد. بر اساس نتایج محاسبات تحلیلی، بیشترین مقدار تنش محوری در فرآیند بارگیری کوره حدود ۲۹/۳۲ مگاپاسکال محاسبه گردید. مطابق با رابطه (۱۸) و با در نظر گرفتن ضریب اصلاحی استاندارد طراحی یوروکد برای حالت تخلیه کوره، مقدار متناظر تنش محوری در حالت تخلیه کوره حدود ۳۳/۷۲ مگاپاسکال به دست آمد.

$$\sigma_e = 1.15\sigma_f \quad (18)$$

که در آن، σ_e تنش مؤثر در حالت تخلیه و σ_f تنش محوری در حالت بارگیری کوره است. طبق شکل ۱۲، تنش تسلیم آلیاژ اینکولوی ۸۰۰ در دمای ۸۰۰ درجه سانتیگراد حدود ۱۲۰ مگاپاسکال است. مقایسه این دو مقدار نشان می‌دهد که تنش اعمالی به طور قابل توجهی کمتر از حد تسلیم ماده است. بنابراین در شرایط کاری فعلی، خرابی ناشی از تسلیم رخ نمی‌دهد و این مکانیزم در کاهش عمر غلاف نقشی ندارد.



شکل ۱۲: تغییرات مقاومت ماده سازنده غلاف بر حسب دمای کاری [۱۶].

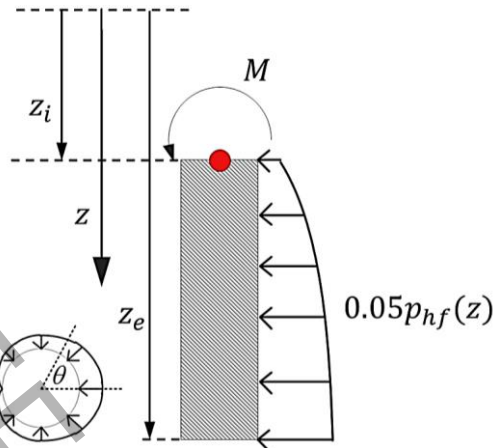
Fig. 12. Strength variation of the protection tube material versus operating temperature [16].

۲-۴-۲- تحلیل خرابی بر اساس معیار خستگی

یکی دیگر از مکانیزم‌های مؤثر در کاهش عمر غلاف، خستگی ناشی از نوسانات تنش در اثر جریان غیریکنواخت مواد دانه‌ای است. در جریان واقعی کوره، به دلیل حرکت نامتقارن گندله‌ها و همچنین عملکرد کلوخه‌شکن بالایی، تنش‌های نوسانی در سطح غلاف ایجاد می‌شود که می‌تواند به رشد تدریجی ترک‌های سطحی منجر گردد. برای ارزیابی این مکانیزم، از مدل تحلیلی مبتنی بر معیار خستگی انجمن مهندسان مکانیک آمریکا^۱ استفاده شد. در این تحلیل فرض شد فشار جانبی وارد بر غلاف در اثر نوسانات جریان، حدود ۵

¹ American Society of Mechanical Engineers (ASME)

درصد نسبت به حالت متقارن محوری انحراف دارد و توزیع آن در محیط غلاف به صورت تابع کسینوسی طبق رابطه (۱۹) تعریف شد. مطابق شکل ۱۳، این نوسانات موجب تغییرات نوسانی فشار جانبی در راستای محور مرکزی کوره می شوند که منشأ اصلی ایجاد تنش های متناوب در غلاف است. بر این اساس، گشتاور خمشی و تنش خمشی نوسانی از روابط (۲۰) و (۲۱) محاسبه شدند.



شکل ۱۳: تغییرات فشار جانبی وارده بر غلاف پایینی به دلیل نوسان جریان گندله ها در راستای محور مرکزی سیلو.

Fig. 13. Lateral pressure variation acting on the lower protection tube due to the pellet flow fluctuation along the central axis of the silo.

$$p_{hf}^d(z) = 0.05 p_{h0} Y_f(z) \cos \frac{\theta}{2} \quad (19)$$

$$M = \int_{z_i}^{z_e} 0.05 p_{h0} Y_f(z) (z - z_i) \int_0^\pi 2r_i \cos \frac{\theta}{2} \cos \theta d\theta dz \quad (20)$$

$$\sigma_B = \frac{Mc}{I} \quad (21)$$

در این روابط، p_{h0} فشار جانبی پایه، $Y_f(z)$ تابع توزیع فشار بر اساس مدل جانسن، r_i شعاع خارجی غلاف، σ_B تنش خمشی نوسانی، c شعاع سطح مقطع و I ممان اینرسی سطح مقطع غلاف است. با جایگذاری مقادیر عددی در روابط فوق، مقدار تنش خمشی نوسانی برابر با ۱۹ مگاپاسکال به دست آمد.

برای ارزیابی پایداری غلاف در برابر خستگی، از رابطه (۲۲) بر پایه معیار خستگی انجمن مهندسان مکانیک آمریکا استفاده شد.

$$\left(\frac{\sigma_B}{S_e} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_a}{S_y} \right)^2 = \frac{1}{n^2} \quad (22)$$

در این رابطه، σ_B تنش خمشی نوسانی، S_e حد خستگی اصلاح شده ماده، σ_a تنش محوری میانگین، S_y تنش تسلیم ماده در دمای کاری و n ضریب ایمنی است. با استفاده از ضرایب اصلاحی سطح و اندازه، مقدار حد خستگی اصلاح شده برابر با ۸۵ مگاپاسکال و تنش تسلیم ماده در دمای کاری برابر با ۱۲۰ مگاپاسکال به دست آمد. با جایگذاری این مقادیر در رابطه (۲۲)، ضریب ایمنی حدود ۲/۸ حاصل شد که بزرگ تر از یک است. بنابراین، می توان نتیجه گرفت که غلاف در برابر خستگی از ایمنی کافی برخوردار است. با فرض اینکه عمر غلاف ۱۰^۷ سیکل باشد و تعداد ۳ سیکل در دقیقه به عنوان شرایط کاری آن در نظر گرفته شود، عمر خستگی غلاف حدود ۵۵۵۰۰ ساعت تخمین زده می شود.

۴-۲-۳- تحلیل خرابی بر اساس معیار خزش

یکی از مهم ترین عوامل کاهش دوام غلاف، پدیده خزش است که در دماهای بالا و تحت تنش های ثابت به تدریج رخ می دهد و موجب کاهش استحکام و تغییر شکل دائم در ماده می شود. این فرآیند شامل سه مرحله اولیه، پایدار و نهایی است که بیشترین بخش عمر خزشی در مرحله پایدار سپری می شود. در این پژوهش، رفتار خزشی غلاف ترموکوپل در شرایط کاری کوره و تحت تنش محوری ثابت

ناشی از فرآیند تخلیه مواد دانه‌ای بررسی شد. مقدار این تنش بر اساس محاسبات تحلیلی مبتنی بر استاندارد طراحی یوروکد و طبق رابطه (۱۸) برابر ۳۳/۷۲ مگاپاسکال است. با در نظر گرفتن دمای ۸۰۰ درجه سانتیگراد و داده‌های تجربی آلیاژ اینکولوی ۸۰۰ و بر اساس جدول ۷ عمر خزشی غلاف حدود ۲۷۷۰۰ ساعت برآورد گردید.

جدول ۷: مقاومت خزشی ماده سازنده غلاف [۱۶].

Table 7. Creep strength of the protection tube material [16].

دمای کاری (°C)	۱۰۰۰۰ ساعت (MPa)	۳۰۰۰ ساعت (MPa)	۵۰۰۰ ساعت (MPa)	۱۰۰۰۰۰ ساعت (MPa)
۶۵۰	۱۲۱	۱۰۳	۹۷	۹۰
۷۰۵	۷۶	۶۶	۶۱	۵۵
۷۶۰	۵۰	۴۳	۴۰	۳۷
۸۱۵	۳۶	۳۰	۲۸	۲۶
۸۷۰	۲۴	۲۱	۱۹	۱۷
۹۲۵	۱۳	۱۱	۱۰	۸/۳
۹۸۰	۸/۳	۶/۹	۶/۲	۵/۵

۴-۲-۴- تحلیل خرابی بر اساس مکانیزم ترکیبی خستگی و خزش

از آن‌جا که غلاف ترموکوپل به‌طور هم‌زمان تحت تنش‌های نوسانی ناشی از جریان غیریکنواخت مواد و تنش‌های ثابت ناشی از وزن و تماس ذرات در دمای بالا قرار دارد، خرابی آن ماهیتی تجمعی یافته و به‌صورت ترکیبی از خستگی و خزش بروز می‌کند. در این حالت، اثر هم‌زمان هر دو مکانیزم در کاهش دوام کلی قطعه باید در نظر گرفته شود. برای تحلیل این پدیده از مدل خطی آسیب تجمعی استفاده شد که در آن مجموع آسیب‌های ناشی از خستگی و خزش برابر یک است و به‌صورت رابطه (۲۳) بیان می‌شود.

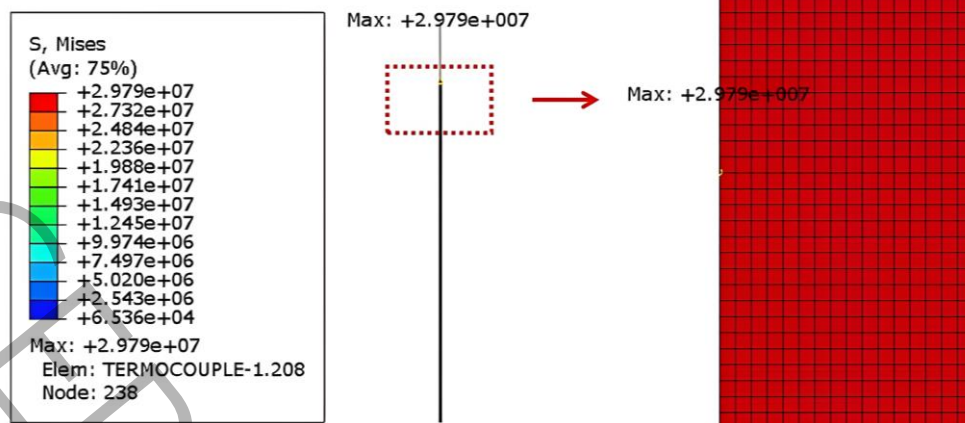
$$D_t = D_f + D_c = \frac{N}{N_f} + \frac{N \times t_h}{t_R} = 1 \quad (23)$$

در این رابطه، D_t بیانگر آسیب کل، N_f عمر خستگی خالص، t_R عمر خزشی خالص و t_h مدت زمان قرارگیری قطعه در شرایط خزش در هر سیکل خستگی است. با فرض آنکه هر سیکل خستگی حدود ۲۰ ثانیه به طول انجامد و مقادیر حاصل از تحلیل‌ها که نشان می‌دهد عمر خستگی خالص ۵۵۵۰۰ ساعت و عمر خزشی خالص ۲۷۷۰۰ ساعت است، ترکیب این دو اثر با استفاده از رابطه (۲۳) محاسبه گردید. نتیجه این برآورد نشان می‌دهد که عمر کلی غلاف تحت اثر بارگذاری ترکیبی خستگی و خزش حدود ۱۸۵۰۰ ساعت است که بیانگر کاهش محسوس دوام غلاف در اثر وقوع هم‌زمان این دو مکانیزم است.

۴-۳- مقایسه نتایج تحلیلی و عددی پدیده خزش

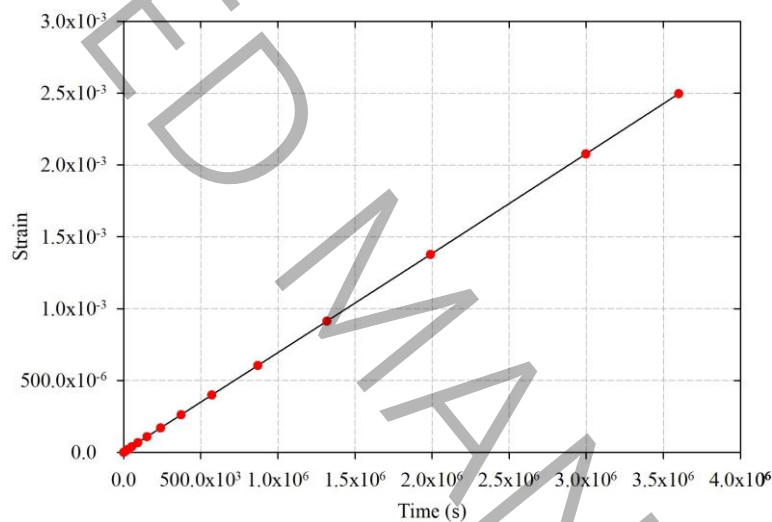
برای اعتبارسنجی نتایج تحلیلی مربوط به دوام غلاف تحت مکانیزم خزش، تحلیل عددی خزش برای بخش داخلی غلاف که بر اساس بیشینه تنش ون‌مایرز^۱ به‌عنوان ناحیه بحرانی در شکل ۱۴ مشخص شده است، انجام شد. در این تحلیل، تغییرات کرنش برحسب زمان در نقطه بحرانی استخراج و مطابق شکل ۱۵ با یک رابطه خطی برازش گردید که در رابطه (۲۴) بیان شده است. بر پایه کرنش شکست آلیاژ اینکولوی ۸۰۰ در دمای ۸۰۰ درجه سانتیگراد، زمان شکست غلاف بر اساس مکانیزم خزش از طریق رابطه (۲۵) محاسبه شد. نتایج نشان داد که عمر خزشی غلاف در شبیه‌سازی عددی حدود ۲۶۹۰۰ ساعت است که با مقدار به‌دست‌آمده از روش تحلیلی (۲۷۷۰۰ ساعت) اختلافی کمتر از ۵ درصد دارد. این هم‌خوانی بیانگر آن است که مدل عددی توانسته رفتار خزشی غلاف را در شرایط واقعی با دقت و اطمینان بالا بازسازی کند.

^۱ Von-Mises



شکل ۱۴: تعیین نقطه بحرانی غلاف ترموکوپل بر اساس تنش فون مایز.

Fig. 14. Determination of the critical point of the thermocouple protection tube based on the von Mises stress.



شکل ۱۵: تغییرات کرنش بر حسب زمان در نقطه بحرانی.

Fig. 15. Strain variation versus time at the critical point.

$$\varepsilon(t) = 7 \times 10^{-10} t + 9 \times 10^{-7} \quad (24)$$

$$t_f = \frac{\varepsilon_f}{\dot{\varepsilon}} = \frac{6.7791 \times 10^{-2}}{7 \times 10^{-10}} = 96.8443 \times 10^6 \text{ s} \approx 26900 \text{ h} \quad (25)$$

در روابط (۲۴) و (۲۵)، کرنش، t زمان، t_f زمان شکست غلاف، ε_f کرنش شکست ماده و $\dot{\varepsilon}$ نرخ کرنش خزشی هستند.

۴-۴- بررسی راهکارهای بهبود عمر غلاف ترموکوپل

با توجه به نتایج تحلیلی و عددی، بیشترین مقدار تنش محوری و در نتیجه بیشترین احتمال خرابی در بخش داخلی غلاف ترموکوپل رخ می‌دهد. از این رو، اصلاح طراحی هندسی غلاف با هدف کاهش شدت تنش‌های محوری و بهبود توزیع بار در طول غلاف مورد بررسی قرار گرفت. در ادامه، اثر این اصلاحات بر میزان تنش محوری و برآورد عمر خزشی و عمر ترکیبی خستگی و خزش در دمای کاری کوره بررسی و نتایج حاصل با طرح موجود مقایسه شد.

۴-۴-۱- افزایش ضخامت پوسته در بخش داخلی غلاف

یکی از راهکارهای مؤثر برای افزایش دوام غلاف، افزایش ضخامت پوسته در بخش داخلی آن است. با افزایش ضخامت، سطح مقطع مؤثر غلاف بزرگ‌تر می‌شود و در نتیجه مقدار تنش محوری کاهش می‌یابد. این تغییر هندسی علاوه بر کاهش تنش، مقاومت در برابر خزش و خستگی را نیز بهبود می‌دهد.

در طرح موجود، ضخامت بخش داخلی غلاف ۴ میلی‌متر بوده و بر اساس محاسبات تحلیلی، بیشینه تنش محوری در حالت تخلیه برابر با ۳۳/۷۲ مگاپاسکال است. با توجه به داده‌های مقاومت خزشی آلیاژ اینکولوی ۸۰۰ در دمای ۸۰۰ درجه سانتیگراد که در جدول ۷ ارائه شده است، عمر خزشی متناظر با این مقدار تنش حدود ۲۷۷۰۰ ساعت و بر اساس رابطه (۲۳)، عمر ترکیبی خستگی و خزش حدود ۱۸۵۰۰ ساعت برآورد می‌شود.

در طرح اصلاحی، ضخامت پوسته داخلی غلاف از ۴ به ۴/۵ میلی‌متر افزایش داده شد. در این حالت، بیشینه تنش محوری بر اساس محاسبات تحلیلی به ۳۰/۱۳ مگاپاسکال کاهش یافت. بر اساس داده‌های مقاومت خزشی آلیاژ اینکولوی ۸۰۰ در جدول ۷، این کاهش تنش موجب افزایش عمر خزشی تا حدود ۴۸۰۰۰ ساعت و افزایش عمر ترکیبی خستگی و خزش به حدود ۲۶۰۰۰ ساعت شد. نتایج جدول ۸ نشان می‌دهد که افزایش ضخامت پوسته در بخش داخلی غلاف موجب افزایش حدود ۴۰ درصد عمر آن نسبت به طرح موجود شده است. این اصلاح هندسی با وجود سادگی و هزینه پایین، می‌تواند روشی کارآمد برای افزایش پایداری و عمر مفید غلاف ترموکوپل در کوره‌های احیای مستقیم باشد.

جدول ۸: تأثیر افزایش ضخامت پوسته داخلی بر عمر خزشی و عمر ترکیبی غلاف ترموکوپل.

Table 8. Effect of increasing the inner shell thickness on the creep life and combined life of the thermocouple protection tube.

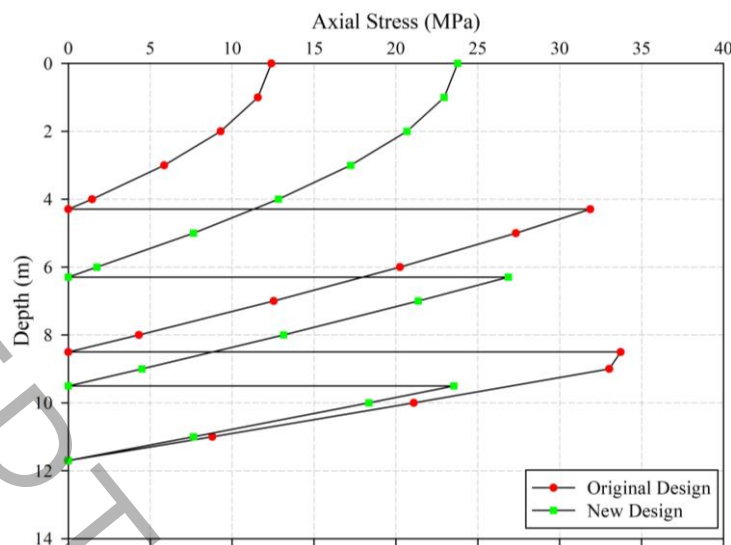
ضخامت (mm)	بیشینه تنش محوری (MPa)	عمر خزشی (h)	عمر ترکیبی خستگی و خزش (h)	افزایش عمر (%)
۴	۳۳/۷۲	۲۷۷۰۰	۱۸۵۰۰	-
۴/۵	۳۰/۱۳	۴۸۰۰۰	۲۶۰۰۰	۴۰

۴-۴-۲- افزایش طول در بخش‌های بیرونی و میانی غلاف

یکی دیگر از روش‌های مؤثر برای افزایش دوام غلاف، افزایش طول بخش‌های بیرونی و میانی آن است. در طرح اصلاحی، طول بخش بیرونی به میزان ۲ متر و طول بخش میانی به میزان ۱ متر افزایش داده شد تا توزیع تنش در راستای محور غلاف یکنواخت‌تر شده و بخشی از بار مکانیکی از نواحی داخلی، که بحرانی‌ترین بخش از نظر خرابی است، به نواحی بالایی منتقل شود. در نتیجه، مقدار تنش محوری در انتهای غلاف کاهش یافته و عمر کاری آن افزایش می‌یابد.

مطابق شکل ۱۶، افزایش طول موجب کاهش قابل توجه مقدار بیشینه تنش محوری در حالت تخلیه کوره از حدود ۳۳/۷۲ مگاپاسکال در طرح موجود به ۲۶/۸۶ مگاپاسکال در طرح اصلاحی شده است. با استفاده از داده‌های مقاومت خزشی آلیاژ اینکولوی ۸۰۰ که در جدول ۷ ارائه شده است، مشاهده می‌شود که این کاهش تنش، عمر خزشی غلاف را تا حدود ۱۰۰۰۰۰ ساعت افزایش می‌دهد.

با در نظر گرفتن اثر هم‌زمان خستگی و خزش و به کارگیری رابطه (۲۳)، عمر ترکیبی غلاف در طرح اصلاحی حدود ۳۵۷۰۰ ساعت برآورد می‌شود که معادل تقریباً چهار سال کارکرد غلاف بدون خرابی است. نتایج جدول ۹ تأیید می‌کند که افزایش طول غلاف سبب بهبود حدود ۹۰ درصد در عمر مؤثر آن نسبت به طرح موجود شده است. این یافته نشان می‌دهد که بهینه‌سازی طول غلاف روشی ساده، اقتصادی و قابل اعتماد برای افزایش دوام و قابلیت اطمینان در شرایط کاری کوره‌های احیای مستقیم محسوب می‌شود.



شکل ۱۶: تغییرات تنش محوری وارده بر سطح مقطع غلاف در راستای عمق (مقایسه طرح موجود و طرح اصلاحی).

Fig. 16. Axial stress variation acting on the cross-section of the protection tube along the depth (comparison of the existing design and the modified design).

جدول ۹: مقایسه بیشینه تنش محوری و عمر کاری غلاف ترموکوپل در طرح موجود و طرح اصلاحی.

Table 9. Comparison of the maximum axial stress and service life of the thermocouple protection tube for the existing design and the modified design.

حالت طراحی	بیشینه تنش محوری (MPa)	عمر خزشی (h)	عمر ترکیبی خستگی و خزش (h)	افزایش عمر (%)
طرح موجود	۳۳/۷۲	۲۷۷۰۰	۱۸۵۰۰	-
طرح اصلاحی	۲۶/۸۶	۱۰۰۰۰	۳۵۷۰۰	۹۰

۵- نتیجه گیری

در این پژوهش با ترکیب محاسبات تحلیلی مبتنی بر استاندارد طراحی یورو و شبیه سازی عددی کوپل اویلری-لاگرانژی، چارچوبی جامع برای ارزیابی رفتار مکانیکی غلاف محافظ ترموکوپل در کوره های احیای مستقیم ارائه شد. مدل عددی توسعه یافته توانست توزیع فشار و تنش محوری ناشی از جریان مواد دانه ای را با دقت بالا بازسازی کند. مقایسه نتایج عددی و تحلیلی نشان داد که اختلاف میان دو مدل کمتر از ۵ درصد است که بیانگر صحت و اعتبار نتایج محاسبات تحلیلی و شبیه سازی عددی می باشد.

تحلیل مکانیزم های خرابی شامل تسلیم، خستگی، خزش و ترکیب خستگی و خزش نشان داد که در دمای ۸۰۰ درجه سانتیگراد، پدیده خزش عامل اصلی کاهش دوام غلاف است. عمر خزشی حدود ۲۷۷۰۰ ساعت و عمر ترکیبی حدود ۱۸۵۰۰ ساعت برآورد شد. اعمال اصلاحات هندسی در دو حالت افزایش ضخامت پوسته بخش داخلی و افزایش طول بخش های بیرونی و میانی غلاف موجب یکنواخت تر شدن توزیع تنش و افزایش عمر مؤثر به ترتیب حدود ۴۰ درصد و ۹۰ درصد گردید.

نتایج این پژوهش چارچوبی علمی برای طراحی بهینه و افزایش دوام غلاف ترموکوپل در کوره های احیای مستقیم فراهم کرده است و می تواند به ارتقای قابلیت اطمینان، کاهش توقف های عملیاتی و صرفه جویی در هزینه های نگهداری منجر شود.

- [1] C. González-Montellano, E. Gallego, Á. Ramírez-Gómez, F. Ayuga, Three dimensional discrete element models for simulating the filling and emptying of silos: Analysis of numerical results, *Computers & chemical engineering*, 40 (2012) 22-32.
- [2] F.O. Boechat, R.M. de Carvalho, L.M. Tavares, Simulation of mechanical degradation of iron ore pellets in a direct reduction furnace, *KONA Powder and Particle Journal*, 35 (2018) 216-225.
- [3] Y. Wang, Y. Lu, J.Y. Ooi, Numerical modelling of dynamic pressure and flow in hopper discharge using the Arbitrary Lagrangian–Eulerian formulation, *Engineering Structures*, 56 (2013) 1308-1320.
- [4] Y. Wang, Y. Lu, J.Y. Ooi, A numerical study of wall pressure and granular flow in a flat-bottomed silo, *Powder Technology*, 282 (2015) 43-54.
- [5] G. Qiu, S. Henke, J. Grabe, Application of a Coupled Eulerian–Lagrangian approach on geomechanical problems involving large deformations, *Computers and Geotechnics*, 38(1) (2011) 30-39.
- [6] C.-H. Lin, C. Hung, T.-Y. Hsu, Investigations of granular material behaviors using coupled Eulerian-Lagrangian technique: From granular collapse to fluid-structure interaction, *Computers and Geotechnics*, 121 (2020) 103485.
- [7] J.H. Rhee, S.I. Kim, Y.M. Lim, M.K. Kim, Finite element investigation of load acting on the hotspot detector located inside the silo caused by material discharge, *Applied Sciences*, 10(17) (2020) 5916.
- [8] R.M. Nedderman, *Statics and kinematics of granular materials*, (No Title), (1992).
- [9] D. Schulze, *Powders and bulk solids: behavior, characterization, storage and flow*, Springer, 2008.
- [10] B. EN, 4: 2006 “Eurocode 1–Actions on structures–Part 4: Silos and Tanks”, British Standard, (2006).
- [11] H. Janssen, Versuche uber getreidedruck in silozellen, *Z. ver. deut. Ing.*, 39 (1895) 1045.
- [12] T. Belytschko, W.K. Liu, B. Moran, K. Elkhodary, *Nonlinear finite elements for continua and structures*, John wiley & sons, 2014.
- [13] J. Donea, A. Huerta, J.P. Ponthot, A. Rodríguez-Ferran, Arbitrary L agrangian–E ulerian Methods, *Encyclopedia of computational mechanics*, (2004).
- [14] Z. Qian, T. Yang, M. Liu, An overview of coupled Lagrangian–Eulerian methods for ocean engineering, *Journal of Marine Science and Application*, 23(2) (2024) 366-397.
- [15] J. Brown, *Numerical analysis of silo discharge*, (2008).
- [16] Incoloy Alloys 800H & 800HT, SMC-047, Special Metals Corporation, New Hartford, NY, 2004, in.
- [17] R. Wolowicz, Creep-rupture properties of Incoloy 800H, 2-1/4 Cr-1 Mo, and Hastelloy X alloys in simulated HTGR environment, General Atomic Co., San Diego, Calif.(USA), 1976.
- [18] M. Booker, Analytical representation of the creep and creep-rupture behavior of Alloy 800h, Oak Ridge National Lab., TN (USA), 1978.

Analytical–Numerical Analysis of the Mechanical Behavior of the Central Thermocouple Protection Tube in a Direct Reduction Furnace.

Hasan Rahimzadeh Moghaddam ^a, *Yadollah Alinia ^a, Mohsen Taghizadeh ^a

^a Faculty of Engineering, Hakim Sabzevari University, Sabzevar, Iran

ABSTRACT

The failure of the central thermocouple protection tube, the primary temperature-monitoring component in direct-reduction furnaces, is investigated. Failure of this critical component disrupts production and increases maintenance costs. This study aims to identify the dominant failure mechanisms and establish a scientific framework for optimizing tube design and extending its service life. A finite element model incorporating the coupled Eulerian-Lagrangian approach was developed in Abaqus to simulate granular material flow and pressure distribution along the furnace centerline, where the protection tube is located. The numerical model was validated against the Janssen analytical model and the Eurocode design standard. Subsequently, the effects of yielding, fatigue, creep, and their combined interaction on tube failure were evaluated. The results indicate that creep is the dominant degradation mechanism at the operating temperature of 800 °C, significantly reducing the tube's durability and service life. Furthermore, the tube geometry and material properties were found to have a substantial influence on the stress distribution and structural integrity. By integrating advanced numerical simulations with classical analytical models, the proposed framework provides a reliable tool for service-life prediction and design optimization, contributing to improved operational reliability and reduced maintenance costs in direct-reduction furnaces.

KEYWORDS

Finite Element Method, Coupled Eulerian–Lagrangian Method, Granular Materials, Thermocouple Protection Tube, Failure Analysis