ماهنامه علمى پژوهشى



مايعات برودتي

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

# ارائه طرحی جدید و تحلیل حرارتی- مکانیکی برای تکیه گاههای داخلی مخازن ذخیره

وحيد نوروزی فرد<sup>1</sup>، ابراهيم عليزاده<sup>2</sup>\*، سيد ميثم حسينی<sup>3</sup>، محمد رضايی فيروزجايی<sup>4</sup>، سيد حسين مسروری سعادت4

> 1-استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی جندی شاپور دزفول، دزفول 2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، فریدونکنار 3- فارغالتحصيل كارشناسي ارشد، مهندسي مكانيك، دانشگاه صنعتي خواجه نصيرالدين طوسي، تهران 4- فارغالتحصيل كارشناسي ارشد، مهندسي مكانيك، دانشگاه صنعتي مالك اشتر، فريدونكنار

> > \* فريدونكنار، صندوق پستى fccenter@mut.ac.ir ،47515373

چکیدہ	اطلاعات مقاله
اختلاف زیاد بین دمای محیط و مایعات برودتی در مخازن ذخیره این مایعات موجب میشود تا انتقال حرارت از طریق تکیهگاههای بین مخزن داخلی و خارجی از اهمیت بالایی برخوردار باشد. در کنار انتقال حرارت پایین، استحکام بالا نیز از جمله پارامترهای مهم در طراحی تکیهگاههای مخازن برودتی محسوب میشود. مواد پلیمری از لحاظ پایین بودن ضریب رسانایی شرایط مطلوبی دارند اما از نظر خواص مکانیکی دارای	مقاله پژوهشی کامل دریافت: 16 تیر 1396 پذیرش: 18 شهریور 1396 ارائه در سایت: 05 آبان 1396
استحکام پایین تری نسبت به فولادها هستند. هدف این تحقیق ارائه یک تکیهگاه جدید مرکب جهت استفاده در مخازن برودتی است که از نظر انتقال حرارت و استحکام بیشترین بازده را داشته باشد. در این طرح، تکیهگاه از دو قسمت پلیمری و فولادی چند لایه ساخته شده است. مقاومت حرارتی بین لایهها در قسمت فولادی، انتقال حرارت این بخش از تکیهگاه را محدود می کند. برای محاسبه میزان دقیق مقاومت حرارت تماسی بین لایهها در فشارها و دماهای مختلف، یک مدل تحلیلی توسعه یافته است. مدل المان محدود میکند. برای محاسبه میزان دقیق تکیهگاه پیشنهادی توسعه یافته و به کمک کد المان محدود انسیس حل شده است. نتایج المان محدود شامل توزیع دما و شار حرارتی عبوری برای تکیهگاه پیشنهادی توسعه یافته و به کمک کد المان محدود انسیس حل شده است. نتایج المان محدود شامل توزیع دما و شار حرارتی عبوری برای تکیهگاه پیشنهادی و یک تکیهگاه پلیمری مقایسه شدهاند. نتایج شار حرارتی عبوری کاهش میزان شار حرارتی عبوری از	<i>کلید واژگان:</i> مخزن مایعات برودتی مقاومت حرارت تماسی تحلیل مکانیکی–حرارتی آنالیزالمان محدود
پیشنهادی در بارگذاری استاتیک مخزن رادر مقایسه با تکیهگاه ساخته شده از بلوک پلیمری نشان میدهد.	

# A new design and thermo-mechanical coupled analysis for internal supports of the cryogenic fluids tanks

## Vahid Norouzifard<sup>1</sup>, Ebrahim Alizadeh<sup>2\*</sup>, Seyed Meysam Hosseini<sup>3</sup>, Mohammad Rezaei Firouzjaee<sup>4</sup>,

#### Seyed Hossein Masrori Saadat<sup>2</sup>

1- Department of Mechanical Engineering, Jundi-shapur University of Technology, Dezful, Iran

- 2- Department of Mechanical Engineering, Malek Ashtar University of Technology, Fereydounkenar, Iran
- 3- Department of Mechanical Engineering, Khaje Nasir Toosi University of Technology, Tehran, Iran

\* P.O.B. 47515373, Fereydounkenar, Iran, fccenter@mut.ac.ir

ARTICLE INFORMATION	ABSTRACT
Original Research Paper Received 07 July 2017 Accepted 09 September 2017 Available Online 27 October 2017	Heat transfer through the internal supports of the cryogenic fluid tanks is an important issue in the tank design and manufacture. On the other hand, the internal supports strength should be enough to stand safely against the forces applied to the internal tank. From the heat insulation point of view, most of the polymers are suitable materials to use in the internal supports. But the low mechanical strength of the
Keywords: Cryogenic tanks Thermal contact resistance Thermo-mechanical analysis Internal support Finite element analysis	most of the polymers limits the life of the supports made from polymers. In this paper, a new composite support made from steel and polymer is presented for the internal supports. Multilayered design of the steel part of the presented supports controls the heat transfer through this part by adding more thermal contact resistance (TCR) to the heat flow path. An analytical model is developed to calculate TCR between layers of the steel part at various pressure and temperature conditions. A thermo-mechanical coupled finite element (FE) model is developed for the proposed support and solved by ANSYS FE code. Temperature distribution and heat fluxof the presented support are investigated by FE analysis results. Heat flow through the new support design is compared with the heat flow of the supports constructed with polymer blocks. Comparison of the heat flow results shows that the amount of heat transferred to the cryogenic tank through the internal supports in the static loading condition decreases when usingproposed composite design instead of polymer blocks.

V. Norouzifard, E. Alizadeh, S. M. Hosseini, M. Rezaei Firouzjaee, S. H. Masrori Saadat, A new design and thermo-mechanical coupled analysis for internal supports of the cryogenic fluids tanks, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 10, pp. 207-216, 2017 (in Persian)

#### 1- مقدمه

مايعات برودتي'، مايعات حاصل از ميعان گازهايي هستند كه دماي جوش آنها پایینتر از <sup>°</sup>C 150- است. از جمله مشکلات ذخیره مایعات برودتی دمای بحرانی بسیار پایین آنها نسبت به دمای محیط است که مقابله با مسئله نشت حرارتی به محل نگهداری آن را ضروری می سازد. متداول ترین نوع مخازن ذخیره و یا حمل مایعات برودتی در حجم بالا، شامل دو جدار داخلی و خارجی هستند که بین جدارهها خلا بوده و از پودر مواد عایق مانند پرلیت٬ سیلیکا ایروژل٬ گویهای فنلیک٬ و ... پر شده است. مخزن بیرونی بهعنوان پشتیبان و نگهدارنده برای مخزن داخلی عمل میکند. برای اتصال مخزن داخلی و خارجی نیاز به یک سیستم تکیه گاهی است. مخزن داخلی بوسیله تکیهگاههای داخلی به شکل میله، کابل، زنجیر و یا بلوک ساخته شده از فولاد، پلیمر و یا مواد مرکب به مخزن خارجی متصل می شود. تکیه گاه داخلی باید استحکام کافی برای تحمل نیروی وزن مخزن پر و بارگذاری اتفاقی و شتابهای عمودی و جانبی را داشته باشد که در این پژوهش برابر نیروی حاصل از شتاب 3g در تمام جهات در نظر گرفته شده است. تکیه گاهها بهعنوان یک پل حرارتی بین دو مخزن می توانند باعث انتقال حرارت از مخزن خارجی به مخزن داخلی گردند. بنابراین اتصال دهندههای بین مخازن علاوه بر استحکام مکانیکی مناسب باید از نظر انتقال حرارت دارای بیشترین مقاومت حرارتی ممکن باشند.

توسعه مخازن ذخیره مایعات برودتی با بهرهوری بالا از سال 1952 در آزمایشگاههای مهندسی برودتی<sup>6</sup> در کلرادوی آمریکا آغاز گردید. تحقیق و توسعه انجام یافته در آن زمان بر روی ذخیره و حمل و نقل مقادیر بالای هیدروژن مایع تمرکز داشت. همزمان با آزمایشگاههای مهندسی برودتی، صنعت نفت در امریکا و خصوصا اروپا به میعان گاز طبیعی و ذخیره و حمل و نقل آن علاقه نشان داد. اولين انتقال گاز مايع از طريق اقيانوس اطلس در سال 1959 اتفاق افتاد که 5000 متر مکعب گاز مایع از آمریکا به بریتانیا انتقال یافت. همزمان در دهه 50 و 60 میلادی مخازن موردنیاز برای حمل 2000 تن اکسیژن و هیدروژن مایع جهت قرار دادن شاتل فضایی در مدار ساخته شدند [1].

با توسعه روز افزون مواد جديد، استفاده از اين مواد در ساخت تکیهگاههای مخازن ذخیره مایعات برودتی برای ایجاد طرحهای بهینهتر در دستور کار قرار گرفته است. مواد پلیمری از جمله موادی هستند که در سالهای اخیر پیشرفتهای چشمگیری در زمینه توسعه و بهبود خواص آنها روی داده است. از این رو مواد پلیمری مورد توجه طراحان و سازندگان مخازن برودتی قرار گرفت تا از مزیت رسانایی حرارتی پایین آنها در ساخت تکیه گاههای با اتلاف حرارتی کمتر بهرهمند گردند. لیزوسکی و همکارانش[2] امكان ساخت تكيه گاه داخلى مخازن ذخيره مايعات برودتى با استفاده از بلوکهایی از جنس پلیمر مانند پلیکربنات و پلیآمید و چند پلیمر دیگر را مورد بررسی قرار دادند. لیزوسکی و همکارانش [2] برای مقایسه پلیمرها از يك مدل المان محدود حرارتي استفاده كردند. آنها با مقايسه نتايج توزيع دما و شار حرارتی انتقالی از بلوک پلیمری نتیجه گرفتند که پلیکربنات بالاترین مقاومت حرارتی را داشته و مناسب ترین گزینه از نظر انتقال حرارت بین مواد بررسی شده برای ساخت تکیه گاه است. لیزوسکی و همکارانش [3] در تحقیقی دیگر استفاده از ماده پلیآمید را برای ساخت تکیهگاه داخلی

مخزن ذخيره مايعات برودتي امكانسنجي كردند. در اين تحقيق، با استفاده از نتايج توزيع دما و شار حرارتي حاصل از آناليز المان محدود و نتايج تجربي، بلوکهای پلیآمید را برای ساخت تکیهگاه مورد بررسی قرار دادند. آنها پلیآمید را به دلیل استحکام مکانیکی خوب، رسانایی پایین، آسان بودن ساخت و هزینه پایین برای ساخت تکیهگاه داخلی مخزن مایعات برودتی پیشنهاد دادند.

از جمله روشهایی که در سالهای اخیر برای کاهش انتقال حرارت در تکیه گاههای داخلی مخازن برودتی مورد توجه قرار گرفته است، ایجاد مقاومت حرارتی در مسیر جریان حرارت در تکیه گاه است [4]. سیزیکای [5] یک نوع تکیهگاه داخلی جدید مرکب از لایههای پلیمر و فولاد ضد زنگ را برای مخازن برودتی پیشنهاد کرده و به کمک روش المان محدود انتقال حرارت را در این نوع تکیه گاه مورد بررسی قرار داده است. "شکل 1" طرح پیشنهادی توسط سیزیکای [5] را نشان میدهد. با توجه به این که پلیمر در مقایسه با فولاد ماده بسیار نرمی است، بنابراین در فشارهایی که تکیه گاه کار میکند نسبت سطح تماس واقعى به سطح تماس ظاهرى فولاد-پليمر عددى نزديک به یک بوده و مقاومت حرارتی بالایی بین سطوح ایجاد نمی کند. در نتیجه، این روش چینش لایهها تاثیر قابل توجهی در کاهش انتقال حرارت تکیهگاه نخواهد داشت. برای تکمیل نواقص طرحهای قبلی و ایجاد حداکثر مقاومت حرارتی، در تحقیق حاضر طرحی جدید برای تکیهگاه داخلی مخزن برودتی مرکب از لایه های فولاد ضد زنگ 304 و یک قسمت پلیمری یک تکه پیشنهاد شده است. در مخازن متحرک حمل مایعات برودتی دو نوع نیرو به مخزن وارد می شود. اولی نیروی ثابت وزن مخزن که بصورت دائمی به تکیه گاه وارد می شود. بار گذاری دیگر، نیروهای دینامیکی حاصل از شوک و ارتعاش هستند که دامنه آنها 3 الی 4 برابر وزن مخزن است که در مدت زمان بسیار کوتاه در حد چندین هزارم ثانیه عمل می کنند. در تکیه گاه پیشنهادی تحمل نیروهای استاتیکی وزن بر عهده قسمت پلیمری است که رسانش حرارت پایینی دارد. در هنگام اعمال نیروهای بارگذاری دینامیکی که دامنه بیشتر از نیروی وزن دارند قسمت فولادی در گیر می شود.

محققین پیشین برای مطالعه عملکرد طرحهای پیشنهادی تکیهگاه داخلي از تحليل المان محدود حرارتي [2], [6] و يا حرارتي و مكانيكي بهصورت جدا از هم<sup>6</sup> [5] استفاده کردهاند. در طرح تکیهگاه پیشنهادی حاضر مقاومت حرارت تماسی بین لایههای قسمت فولادی نقش کلیدی در کاهش انتقال حرارت این قسمت از تکیه گاه را ایفا می کند. مقاومت حرارت تماسی تابع دما و فشار بین لایه ها است بنابراین برای مدلسازی این تکیه گاه لازم است اولا تحلیل حرارتی- مکانیکی همزمان<sup>۷</sup> صورت گیرد و ثانیا مقدار دقیق



Fig. 1The composite internal support design proposed by czyzycki [5] **شکل 1** طرح تکیهگاه مرکب داخلی پیشنهاد شده توسط سیزیکایی [5]

DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.10.59.7

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Cryogenic <sup>2</sup> Perlite

Silica aerogel

 <sup>&</sup>lt;sup>4</sup> Phenolic spheres
 <sup>5</sup> Cryogenic Engineering laboratories

 <sup>&</sup>lt;sup>6</sup> Uncoupled temperature and displacement
 <sup>7</sup> coupled temperature and displacement

ضریب انتقال حرارت تماسی در فشار و دمای مختلف تعیین گردد.

روشهای تعیین ضریب انتقال حرارت تماسی بین دو سطح شامل روش تجربی و تعیین تحلیلی مقدار این ضریب هستند. روش تجربی معمولا بر اندازه گیری توزیع دما در جسم و در نزدیکی سطح تماس و شار عبوری از دو سطح استوار است. روشهای تحلیلی تعیین ضریب هدایت حرارتی نیز در سالهای اخیر توسعه قابل ملاحظهای یافتهاند. نیشینو و همکارانش [7]، سینگال و همکارانش [8]، سریدهار و یووانویچ [9]، سادوسکی و استاپکویز [10]، همیساید و همکارانش [11] و بهرامی و همکارانش [12] با مدلسازی تغییر شکل بلندی های میکروسکوپی زبری سطح و انجام تحلیل آماری بر روی ارتفاع زبری سطوح، مساحت واقعی تماس و ضریب انتقال حرارت تماسی بین دو فلز را محاسبه کردهاند. در تحقیق حاضر، پس از مطالعه و بررسی دقیق مدل های تحلیلی بالا، یک مدل تحلیلی مناسب برای محاسبه ضريب انتقال حرارت تماسى توسعه يافته است. نتايج اين مدل بهعنوان دادههای ورودی در تحلیل حرارتی- مکانیکی تکیه گاه مورد استفاده قرار گرفته است. از کد المان محدود انسیس<sup>۱</sup> برای حل مدل المان محدود استفاده شده است. نتایج المان محدود شامل توزیع دما و شار حرارتی عبوری از تکیهگاه برای طرح پیشنهادی و یک تکیهگاه تمام پلیمری مقایسه شدهاند.

## 2- مدل المان محدود حرارتی-مکانیکی 2-1- مشخصات طرح پیشنهادی برای تکیهگاه

مدل پیشنهادی در این تحقیق، یک پایه مرکب شامل یک قسمت پلیمری و یک قسمت ساخته شده از فولاد ضد زنگ 304 است که قسمت فولادی برای كاهش انتقال حرارت بهصورت لايهاى ساخته شده است. "شكل 2" نماى برش خورده طرح پیشنهادی را نشان میدهد. در مدل پیشنهادی نشان داده شده در "شكل 2" يك استوانه از جنس پلىآميد Torlan 4203به قطر 50 mm در مركز و در اطراف آن 240 ورقه فولاد ضدزنگ 304 با قطر خارجي و داخلی به ترتیب mm و mm و 50 mm و 50 mm داخلی به ترتیب 0.5 mm همان طور که در جزئیات "شکل 2"نشان داده شده است، ارتفاع استوانه یلیمری با اندازه mm از ورقههای فولادی بلندتر است. بیشتر بودن ارتفاع بلوک پلیمری به تکیهگاه این امکان را میدهد که نیروهای استاتیک حاصل از وزن مخزن فقط از طریق استوانه پلیمری تحمل شوند و در مواقع بارگذاری استاتیک بلوک فولادی که انتقال حرارت بیشتری دارد با مخزن تماس نداشته باشد. بنابراین تنش در بلوک پلیمری هیچگاه از MPa 15 بیشتر نخواهد شد و در صورت افزایش بار حاصل از بارگذاری دینامیک، ورقههای فولادی اضافه بار اعمالی را تحمل خواهند کرد. یک تکیه گاه تمام پلیمری به قطر 90 mm برای مقایسه عملکرد تکیه گاه مرکب پیشنهادی نیز در مدلسازی المان محدود در نظر گرفته شده است.

جدول 1ضریب انتقال حرارت رسانایی و استحکام مکانیکی جند نوع پلیمر متداول مورد استفاده در صنایع برودتی را نشان می دهد. علاوه بر مشخصات فوق در جدول 1 برای پلیمرها نسبت استحکام به ضریب انتقال حرارت رسانایی داده شده است. هر چه مقدار نسبت استحکام به رسانایی بیشتر باشد ماده مذکور برای استفاده در تکیه گاه داخلی مخزن برودتی مناسبتر است زیرا امکان ساخت تکیه گاه با سطح مقطح کوچکتر و انتقال حرارت کمتر را مهیا می سازد. جنس بلوک پلیمری از پلی آمید تورلان

<sup>1</sup> ANSYS <sup>2</sup> Torlan

4203 انتخاب شده است که از جمله پلیمرهای مورد استفاده در صنایع برودتی است. این پلیمر ضمن ضریب رسانایی پایین، استحکام مکانیکی مناسبی نیز دارد. جنس ورقههای فولادی تکیهگاه پیشنهادی از فولاد ضدزنگ AISI 304 در نظر گرفته شده است. ضریب رسانش در دمای مختلف و استحکام کششی پلیآمید و فولاد ضد زنگ در جدول 2 آمده است. علت استفاده از ماده پلیمری در هسته و ورقههای فولادی در اطراف برای تکیهگاه مرکب حاضر سهولت ساخت و مونتاژ این نوع ترکیب می باشد.

#### 2–2– مدل المان محدود

"شکل 3" مدل تکیهگاه مرکب داخلی را نشان می دهد که با المانهای سه بعدی در کد المان محدود انسیس المان بندی شده است. این المآن ها قابلیت تحلیل همزمان مکانیکی و حرارتی را دارند. قابلیت تحلیل حرارتی-مکانیکی همزمان این امکان را برای مدل المان محدود توسعه یافته بوجود می آورد که با محاسبه فشار بین سطوح و دمای تماس، مقدار دقیق ضریب انتقال حرارت تماسی را حین حل اعمال نماید. همان طور که در "شکل 3" نیز مشاهده می شود، به دلیل تقارن شکل تکیهگاه داخلی و قسمتهای مدل سازی شده از مخازن داخلی و خارجی، نیمی از تکیهگاه داخلی مدل سازی شده است. بنابراین برای صفحه تقارن قیدهای تقارن هم برای تحلیل مکانیکی و هم تعلیل حرارتی در نظر گرفته شده است. شرایط مرزی مکانیکی نیز بصورت قیدهای جابجایی در تمام درجات آزادی و فشار به ترتیب در سطح خارجی مخزن خارجی و سطح داخلی مخان داخلی اعمال شدهاند. بین سطوح در قیدهای ماس، تماس مکانیکی- حرارتی با ضریب انتقال حرارت تماسی تابع فشار و دما اعمال شده است.

جدول 1 مقایسه نسبت استحکام به ضریب رسانایی برخی مواد پلیمری متداول Table 1 Comparison of the mechanical strength to thermal conductivity ratio for some common polymers

	استحكام	نسبت استحكام	ضريب	
مرجع	کششی	کششی به	رسانایی	مادہ
	MPa	رسانايى	W/mK	
[13], [14]	140	538	0.26	Torlan 4203 -
[15]	207	420	0.402	polyamide-imide
[15]	207	420	0.492	Tecamax SRP*
[14]	70	368	0.19	PMMA
[14]	62	310	0.2	Polycarbonate
[14]	46	328	0.14	polystyrene

**جدول 2** استحکام کششی و ضریب رسانایی فولاد ضد زنگ 304[2] و پلیآمید 103[16] در گستره دمایی K 50 تا X 300 (16]

Table 2 Olumate strength and Thermal conductivity of 71151 504	
stainless steel and Torlan 4203 polyamide at 50-300 K	

Torlan 4203	AISI 304	دما(K)	
نی (W/m <sup>2°</sup> C)			
0.06	11.8	50	
0.11	12.2	100	
0.17	12.5	150	
0.19	12.8	180	
0.21	13	200	
0.22	13.4	225	
0.23	13.9	250	
0.24	14.4	275	
0.244	15	300	
تنش نهایی (MPa)			
140	505	300	
مدول الاستيک (GPa)			
4.48	200	300	



Fig. 2 The proposed internal support section شکل 2 نمای برش خورده از طرح تکیه گاه داخلی مرکب



Fig. 3 The meshed finite element model of internal support شكل 3 مدل المان محدود مشربندى شده تكيه گاه داخلى

شرایط مرزی تحلیل حرارتی نیز برای سطوحی که با هوا (سطح بیرونی مخزن بیرونی) و اکسیژن مایع (سطح داخلی مخزن داخلی) در تماس هستند عبارتند از [5]:

- در سطوح تماس اکسیژن مایع با مخزن داخلی انتقال حرارت همرفتی
   با ضریب همرفتی W/m<sup>2</sup>K با دمای ثابت مایع برابر
   (90 K) 20 8C و
- در سطوح بیرونی مخزن خارجی که با هوای محیط در ارتباط هستند انتقال حرارت همرفتی با ضریب همرفتی W/m<sup>2</sup>K یا دمای ثابت محیط برابر (X 300) C<sup>o</sup> 23 در نظر گرفته شدهاند.

به دلیل این که قسمت بین دو مخزن خلا خواهد بود برای سایر سطوح شرط مرزی آدیاباتیک در نظر گرفته شده است.

## 3- توسعه مدل تحلیلی ضریب انتقال حرارت تماسی 1-3- ضریب انتقال حرارت تماسی

سطوح مهندسی به هر میزان که صافی سطح خوبی داشته باشند وجود پستی و بلندیهای میکروسکوپی در آنها اجتناب ناپذیر است. در هنگام تماس دو سطح با همدیگر قلههای این پستی و بلندیها که دارای ارتفاع بیشتری نسبت به نقاط اطراف شان هستند با قلههای سطح دیگر تماس پیدا میکنند و قسمتهای پست تر از دو سطح با هم تماس فیزیکی نخواهند داشت. بنابراین، بسته به فشار تماس بین دو سطح تنها کسری از مساحت ظاهری با هم تماس پیدا میکنند که این مساحت را مساحت واقعی تماس مینامند. با افزایش فشار بین دو سطح این پستی و بلندیها دچار تغییر شکل پلاستیک شده و تعداد نقاط تماس واقعی و در نتیجه سطح تماس واقعی افزایش مییابد. در حین تماس دو سطح، بلندیهای پروفیل دو سطح به هم متصل

میشوند و درصد بالایی از شار حرارتی در حال انتقال بین دو جسم باید از نقاط تماس واقعی عبور کند که کسری از کل سطح مقطع ظاهری در حال تماس را می سازد. بنابراین سطحی که شار حرارتی از آن عبور می کند به طور ناگهانی کاهش می یابد و این کاهش ناگهانی سطح عبور گرما باعث ایجاد مقاومت گرمایی می شود. "شکل 4" شارهای حرارتی و توزیع دما در نزدیکی دو سطح ناصاف در حال تماس را نشان می دهد. در نقاطی از سطوح که با هم تماس پیدا نکرده اند در صورت وجود گپ گازی انتقال حرارت از طریق گاز نیز صورت می گیرد. با توجه به خلا بودن محیط اطراف تکیه گاه داخلی و دمای بسیار پایین از حرارت منتقل شده توسط گپ گازی و تشعشع می توان صرف نظر کرد.

ضریب انتقال حرارت تماسی به صورت معکوس مقاومت حرارتی موجود بین دو سطح تعریف می شود. معادله زیر رابطه بین شار حرارتی عبوری از واحد سطح p، دمای دو سطح T و ضریب انتقال حرارت تماسی  $h_c$  را نشان می دهد:

$$q = h_c (T_A - T_B) \tag{1}$$

کوپر و همکارانش [17] برای دو سطح در حال تماس در خلا معادله زیر را برای محاسبه ضریب انتقال حرارت تماسی پیشنهاد کردند:

$$h_{\rm c} = \sqrt{\frac{1}{8\pi} k_s \left(\frac{m}{\sigma}\right) \frac{\exp(\lambda^2)}{\left[1 - \sqrt{\frac{1}{2} \operatorname{erfc}(\lambda)}\right]^{1.5}}}$$
(2)

که در آن  $\sigma$  m و  $\lambda$  به ترتیب شیب زبری سطوح، زبری سطح، متوسط ضریب رسانایی دو سطح در حال تماس و عدد بی عد نشان دهنده جدایش دو سطح هستند. متوسط ضریب رسانایی و جدایش دو سطح بصورت زیر محاسبه می شوند:

$$k_{s} = \frac{2k_{1} \cdot k_{2}}{k_{1} + k_{2}} \tag{3}$$

$$\lambda = \operatorname{erfc}^{-1}\left(\frac{2P}{H_{\operatorname{mic}}}\right) \tag{4}$$

که در آن  $P_{k2}$   $k_2$  و  $H_{mic}$  به ترتیب ضریب رسانایی سطوح در حال تماس، فشار بین دوسطح و میکروسختی ویکرز سطح نرمتر هستند. یوانویچ (به نقل از بهرامی [18]) براساس مدل کوپر و همکارانش [17] معادله زیر را برای محاسبه ضریب انتقال حرارت تماسی بین دو سطح زبر بدون اعوجاج پیشنهاد داد:

$$h_c = 1.25k_s \left(\frac{m}{\sigma}\right) \left(\frac{P}{H_{\rm mic}}\right)^{0.95} \tag{5}$$

که نسبت به معادله (2) از پیچیدگی کمتری برخوردار است و در این تحقیق نیز برای محاسبه ضریب انتقال حرارت تماسی بین لایههای فولاد ضد زنگ و سطح تماس بین پلیمر و فولاد انتخاب شده است.

#### 3-2- آنالیز زبری سطوح در حال تماس

هنگامی که پستی و بلندی های همسانگرد<sup>۱</sup> در یک سطح به صورت اتفاقی توزیع شده باشند، سطح مذکور یک سطح گاوسی نامیده می شود [19]. ویلیامسون<sup>۲</sup> و همکارانش [20] نشان دادند که اغلب فرایندهای ساخت و تولید بر روی قطعات سطوح گاوسی تولید می کنند. هدف نهایی حل مسائل مکانیک تماس تعیین هندسه روی هم افتادن و تماس بین دو سطح در حال تماس به صورت تابعی از فشار عمودی بین آن ها یا موقعیت نسبی شان است. "شکل 5" سطح مقطع پستی و بلندی های میکروسکوپی دو سطح در حال

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>Isotropic <sup>2</sup>Williamson



Fig. 4 Thermal flux transfer through the contact area between two body شکل 4 شار عبوری از سطح تماس دو جسم در حال تماس



Fig. 5 Schematics of microscopic contact between a) two rough surfaces and b) rough and smooth flat surfaces[21] شكل 5 تصویری شماتیک از تماس میکروسکوپی بین a) دو سطح زبر و b) سطح زبر معادل با سطح فرضی هموار و صاف [21]

تماس و برخی احتمالات روی هم افتادگی و تماس بین آنها را نشان میدهد.

همانطورکه در این شکل مشاهده میشود، بینهایت موقعیت تماس تصادفی را بین پستی و بلندیهای دو سطح میتوان تصور نمود که باعث افزایش سختی و پیچیدگی تحلیل مسئله تماس بین دو سطح میشود. بنابراین گرین وود و ویلیامسون [22] پیشنهاد کردند که مسئله تماس بین دو سطح گاوسی به مسئله تماس بین یک سطح گاوسی معادل و یک سطح هموار صاف سادهسازی گردد. مشخصات سطح معادل از معادلههای زیر محاسبه می شود.

$$\sigma = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} \tag{6}$$

$$m = \sqrt{m_1^2 + m_2^2}$$
(7)

که در آن  $\sigma$   $\sigma$   $\sigma$  و $\sigma$ زبری ریشه متوسط مربعات سطح<sup>۱</sup> به ترتیب برای  $m_2 \, \, \sigma_1 \, \sigma$  و  $m_2 \, \, m_2 \, \sigma_1 \, \sigma$  و  $m_2 \, \, \sigma_1 \, m$  و  $m_1 \, m$  و معادل ، سطح شیب پستی و بلندیها در سطح معادل و سطوح اول و دوم در حال متوسط شیب پستی  $\sigma$  و زبری متوسط تماس هستند. برای سطوح گاوسی رابطه  $\sigma = 1.25 R_1$  بین  $\sigma$  و زبری متوسط سطح  $R_1$  برقرار است.

با توجه به دادههای مربوط به اندازه گیری زبری سطوح مختلف، برخی محققین رابطههایی برای بستگی بین شیب و زبری سطح پیشنهاد دادند.

بهرامی [18] سه معادله پیشنهادی را با گستره وسیعی از دادههای اندازه گیری شده مقایسه کرده است. با توجه به این مقایسه معادله ارایه شده توسط لامبرت<sup>7</sup> و فلچر<sup>7</sup> (به نقل از بهرامی [18]) گستره بیشتری از دادههای تجربی از 1 تا 10 میکرومتر زبری را پوشش میدهد و در این تحقیق برای معادله پراکندگی دارند، بهرامی [18] توصیه کرده است در صورت امکان مقادل شیب از طریق اندازه گیری مستقیم بهدست آید و از معادله فقط برای مقدار شیب از و در مواقعی که امکان اندازه گیری مقدور نیست استفاده گردد. لامبرت و فلچر (به نقل از بهرامی [18]) رابطه بین شیب و زبری سطح را بهصورت زیر پیشنهاد کردهاند: (8)

### 3-3- میکروسختی ویکرز

میکروسختی ویکرز سطح نرمتر یکی دیگر از پارامترهای معادله (5) است. "شکل 5b" نشان میدهد که میتوان زبری سطح سخت تر را بهعنوان فروروندههایی در نظر گرفت که در سطح نرمتر فرو میروند و نقاط تماس واقعى را ايجاد مىكنند. بنابراين لازم است رابطهايى بين مقادير حاصل از آزمایش سختی ویکرز با میزان نفوذ سطح سخت تر در ماده نرمتر در مسئله تماس مکانیکی ایجاد گردد. در مقادیر نفوذ فرورونده کم (کوچکتر از 40 μm) عدد سختی ویکرز وابسته به مقدار نفوذ فرورونده است و با کاهش آن بهصورت توانی افزایش پیدا میکند. بنابراین سختیسنجیهایی که با نیروهای فشاری کم (بین 1 تا 100 گرم نیرو) و با عمق نفوذ کمتر از 10 µm انجام می شود با عنوان سختی میکرو-ویکرز معرفی می کنند و مقادیر بزر گتر با عدد سختی ویکرز شناخته می شود. حقاضی ۲ (به نقل از بهرامی [18]) با انجام آزمایش های تجربی بر روی 4 ماده مختلف نشان داد که مقدار سختی با افزایش عمق نفوذ فرورونده کاهش می یابد تا به سختی حجمی برسد. "شکل 6" نمودار تغییرات میکروسختی ویکرز برحسب عمق اثر فرورنده حاصل از تحقيقات حقاضي (به نقل از بهرامي [18]) را نشان ميدهد. حقاضي چنين استنتاج کرد که این افزایش در میکروسختی و تنش تسلیم ماده در نزدیکی سطح بهدلیل کار سختی موضعی و یا مکانیزمهای سختی سطح است. او معادله تجربی زیر را با توجه به نتایج آزمایش های تجربی پیشنهاد داد:



Fig. 6Variation of Vickers hardness versus indentation depth ([18] شکل 6 رابطه بین میکروسختی ویکرز و عمق نفوذ فرورونده (به نقل از بهرامی

<sup>2</sup>Lambert <sup>3</sup>Fletcher <sup>4</sup>Hegazy

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>RMS surface roughness

 $H = c_1 (d')^{c_2}$ 

(9)

که در آن  $d_{
m v} = d_{
m v} d_{
m o} = d_{
m v} d_{
m o} = d_{
m v} d_{
m o}$  که در آن  $d_{
m v} = d_{
m v} d_{
m o}$ برحسب mm و c1, c1 ثابتهای ماده هستند که از اندازه گیری میکروسختی بهدست میآیند. ضرایب c1, c2 برای فولاد ضد زنگ 304 به ترتیب برابر 6.271 GPa و 0.229- هستند. معادله (9) وابستگی میکروسختی به هندسه فرورونده و عمق فرورفتگی را نشان میدهد که در مورد تماس دو سطح، فروروندهها زبري سطوح هستند. بنابراين سانگ و يوانويچ (به نقل از بهرامي [18]) معادله زیر را برای محاسبه نسبت فشار بر میکروسختی در زبری سطوح در حال تماس پیشنهاد کردند:

$$\frac{P}{H_{\rm mic}} = \left[\frac{P}{c_1 \left(1.62\frac{\sigma}{m}\right)^{c_2}}\right]^{\frac{1}{(1+0.071c_2)}}$$
(10)

یه در آن 
$$\sigma' = \sigma/\sigma_0$$
 و  $\sigma_0 = 1\,\mu m$  هستند.

#### 3-4- تاثیر دما بر ضریب انتقال حرارت تماسی

در معادله (5) دو پارامتر متاثر از دما وجود دارند که باعث تغییرات در ضریب انتقال حرارت تماسی در دماهای مختلف می شوند که عبارتند از ضریب رسانایی متوسط ks و میکروسختی Hmic. تاثیر دما بر ضریب رسانایی متوسط با توجه به معادله (3) با تغییرات ضریب رسانایی دو ماده در حال تماس  $k_1$  و k2 با دما اعمال می شود. سختی مقاومت ماده در برابر تغییر شکل پلاستیک موضعی در ماده است. بنابراین، تغییرات استحکام تسلیم ماده باعث تغییر در میکروسختی خواهد شد. تابور [23] براساس نتایج تجربی معادله زیر را برای محاسبه سختی ماده تحت کنگره گذاری پلاستیک<sup>۲</sup> پیشنهاد کرده است:  $H = C\sigma_r$ 

که در آن C ثابتی است که به هندسه فرورونده ٔ بستگی دارد و $\sigma$  تنش سیلان پلاستیک ماده تحت کرنش پلاستیک rئاست که نماینده میدان تغييرشكل پلاستيك ماده زير قطعه فرورونده است. معادله(11)نيز ارتباط میان استحکام تسلیم ماده و سختی را نشان میدهد. پس برای تعیین سختی در دماهای مختلف میتوان معادله (11) را به صورت زیر بازنویسی نمود:

$$H_T = \frac{(\sigma_r)_T}{\sigma_r} H_0 \tag{12}$$

که در آن  $H_{0}$ ،  $(\sigma_{r})_{T}$  و  $H_{T}$  به ترتیب تنش سیلان ماده زیر فرورونده در دمای T، سختی ماده در دمای محیط و سختی ماده در دمای T هستند. برای محاسبه میکروسختی در دماهای مختلف در معادلات (9) و (10) نیز می توانیم ضریب  $\sigma_r$  می ابه میکروسختی ماده در دمای محیط ضرب  $(\sigma_r)_T / \sigma_r$ كنيم. بنابراين معادله (10) را ميتوان بهصورت زير بازنويسي كرد:

جدول 3 تنش سیلان فولاد ضد زنگ 304 در کرنش پلاستیک 0.1 [24] و نسبت 300 K در گستره دمایی Σ 5 تا (σ<sub>r</sub>)<sub>T</sub> σ<sub>r</sub>

Table 3 Flow stress of AISI 304 stainless steel at plastic strain of 0.1 and  $(\sigma_r)_T / \sigma_r at 5-300 \text{ K}$ 

نسبت تنش سیلان پلاستیک مادہ در	تنش سیلان پلاستیک مادہ	دما(K)	
دمای موردنظر	(MPa)		
1.800	1055	5	
1.483	869	77.6	
1.26	738	122	
1.188	696	197	
1	586	300	

<sup>1</sup>Song <sup>2</sup> Plastic indentation <sup>3</sup> Indenter

$$\frac{P}{H_{\rm mic}} = \left[\frac{P}{c_1\left(\frac{(\sigma_r)_T}{\sigma_r}\right)\left(1.62\frac{\sigma'}{m}\right)^{c_2}}\right]^{\frac{1}{(1+0.071c_2)}}$$
(13)

محققین مقادیر 0.012-0.08 را برای کرنش پلاستیک *ɛ*r پیشنهاد كردهاند [21]. در اين تحقيق از مقدار كرنش 0.1 استفاده شده است كه نزدیک به متوسط گستره پیشنهادی است. با توجه به نمودار تنش-کرنش واقعی فولاد ضدزنگ 304 [24] در دمای محیط و برخی دماهای زیر صفر، 3 مقادير تنش سيلان در كرنش پلاستيك 0.1 و نسبت  $\sigma_r$ ) در جدول  $\sigma_r$ آمده است.

## 4- نتايج

1-4- ضریب انتقال حرارت تماسیدرفشارها و دماهای مختلف کاری مقادیر ضریب انتقال حرارت تماسی در دماها و فشارهای مختلف برای دو سطح در حال تماس از جنس فولاد ضد زنگ SS 304 و با زبری سطح ۱µm، 2μm و 3μm با استفاده از معادلات (5) و (12) محاسبه شدند. "شکل 7" نمودار تغییرات ضریب انتقال حرارت تماسی دو سطح با زبری 1μm برحسب فشار در دماهای مختلف را نشان میدهد. مطابق "شکل 7" با کاهش دما به دليل افزايش استحكام تسليم فولاد ضريب انتقال حرارت تماسى كاهش قابل ملاحظهای یافته است. برای نمایش تاثیر زبری سطح بر ضریب انتقال حرارت تماسی، در "شکل 8" نمودار تغییرات ضریب انتقال حرارت تماسی برحسب فشار دو دمای X 300 و 77.6 K برای ورق های فولادی در حال تماس با زبری سطح 2μm ،1μm و 3μm نشان داده شده است. با توجه به شکل 8" افزایش زبری سطح از 1μm به 3μm ضریب انتقال حرارت تماسی را در حدود 30 درصد کاهش میدهد

برای سطوح تماس بین فولاد و پلیمر، با توجه به این که سختی پلیمر در مقایسه با فولاد بسیار کم است پلیمر ماده نرمتر محسوب می شود. بنابراین در معادله (5) از سختی پلیمر استفاده می شود. سختی پلی آمید توسط ماتیوو همكارانش [25] برابر 20MPa گزارش شده است. "شكل 9" تغییرات ضریب انتقال حرارت تماسی برحسب فشار بین دو سطح فولاد و پلیآمید را در دماهای مختلف نشان میدهد. با مقایسه "شکل 7 و 9" مشاهده میشود که در دمای X 300 و فشار 40MPa ضریب انتقال حرارت تماسی در تماس پلیمر-فولاد بیش از سه برابر مقدار این ضریب در سطح تماس فولاد- فولاد



Fig. 7 Thermal contact conductance versus pressure for two SS304 contacting surface with 1µm roughness

شکل 7 ضریب انتقال حرارتی برحسب فشار برای تماس یک جفت ورق فولاد 1µm با زبری سطح SS304



Fig. 10 Thermal contact conductance versus pressure for two SS304 contacting surface with  $1\mu m$  roughness in two condition; clean and dusted

**شکل 10** ضریب انتقال حرارتی برحسب فشار برای تماس یک جفت ورق فولاد SS304 با زبری سطح 1µm در دو حالت: پوشیده با غبار فلز و تمیز

مراجع علمی معتبر راستی آزمایی شده است. برای این منظور یک مدل المان محدود مطابق "شکل 11" ساخته شده است که متشکل از دو صفحه برنجی در ابتدا و انتها و 49 ورقه فولادی گرد بقطر mm 25 از جنس فولاد ضدزنگ 304 است. دمای صفحات فولادی به ترتیب در دمای 76 و 296 ثابت نگه داشته شدهاند. اصراف ورقههای فولادی عایق, ندی شده است بهطوری که امکان انتقال حرارت در جهت شعاعی وجود ندارد. صفحات برنجی با فشار قابل تنظیم بهم فشرده شدهاند. میزان شار حرارتی این ورقهها توسط مایکسل و اسکات[4] اندازه گیری شده است. "شکل 12" نمودار تغییرات شار حرارتی عبوری برحسب فشار را برای این مدل نشان میدهد. در "شکل 12" نتایج المان محدود بدست آمده از تحلیل مدل حاضر مطابقت قابل قبولی را با دادههای تجربی [4] نشان میدهند. مقایسه دادههای تجربی با نتایج المان محدود همچنین حداکثر خطای %6 را برای فشارهای بین 5 تا MP 10 را نشان میدهد که فشار مورد انتظار بین ورقههای فولادی در مدل تکیه گاه مرکب پیشنهادی در تحقیق حاضر است.

#### 4-3- نتایج حل المان محدود تکیهگاه و توزیع دما و شار حرارتی

نتایج ضریب انتقال حرارت تماسی بهدست آمده از مدل توسعه یافته در این



Fig. 11 Meshed finite element model based on Mikesell and Scott's [4] Experimental set up

**شکل 11** مدل المان محدود مشبندی شده مطابق مدل آزمایشگاهی مایکسل و اسکات [4]



Fig. 8Thermal contact conductance versus pressure for two SS304 contacting surface with 1 $\mu$ m, 2 $\mu$ m and 3 $\mu$ m roughness model of  $\mu$  degree of the state of the

فولاد SS304 با زبری سطح μm، μm و 3μm



Fig. 9 Thermal contact conductance versus pressure for SS304 and poly amide contacting surfaces شکل 9 ضریب انتقال حرارت تماسی برحسب فشار برای تماس فولاد SS304 با پلیمر پلیآمید

است.

318

یکی از راههای افزایش مقاومت حرارت تماسی بین سطوح فلزی پوشاندن سطوح این فلزات با غبار موادی است که ضریب رسانش حرارت پایینی دارند. دی اکسید منگنز مادهای است که در تحقیقات قبلی برای این منظور استفاده شده است [4]. با توجه به این که ضریب رسانش حرارتی بیشتر اکسیدهای فلزی در حدود 1 W/m C الی 2 W/m C است در این پژوهش برای بررسی اثر استفاده از غبار بر افزایش ضریب انتقال حرارت تماسی یک ماده با ضریب رسانش 2 W/m C بین ورقها فرض شده است. در "شکل 10" مقادیر ضریب انتقال حرارت تماسی برای سطوح تمیز و غبار آلود برای سطوح در حال تماس با زبری μ 1 در دمای X 00 و 77.6 کاهش مقایسه شدهاند. "شکل 10" نشان می دهد که افزودن غبار فلز ضریب انتقال حرارت تماسی را به ترتیب 2.5 تا 3 برابر در دمای X 300 و 77.6 کاهش

#### 4-2- اعتبارسنجي نتايج مدل المان محدود

برای این که از صحت نتایج مدل المان محدود حاضر اطمینان حاصل شود، در این تحقیق ابتدا دادههای مدل المان محدود با نتایج تجربی منتشر شده در





مقاله بهعنوان پارامتر ورودی مدل المان محدود تکیهگاه داخلی (قسمت 2 مقاله) اعمال شدهاند. برای این که اثر شرایط سطوح ورقههای فولادی و نیروی وارد بر تکیهگاه پیشنهادی در این مقاله بر میزان اتلاف حرارتی آن بررسی گردد چندین تکیهگاه با شرایط بارگذاری مختلف در نظر گرفته شدهاند که مشخصات آنها در جدول 4 آمده است. تکیهگاههای 7 تا 9 از جدول 4 کاملا از پلیمر پلیآمید ساخته شدهاند که برای مقایسه عملکرد تکیهگاه پیشنهادی حاضر با تکیهگاه پلیمری مدلسازی شده است.

بعد از تکمیل مدل المان محدود تکیه گاههای جدول 4 حل این مدل ها توسط کد المان محدود انسیس انجام شد. "شکل 13a"توزیع دما در تکیه گاه اسل که ساخته شده از پلیمر و ورقههای فولادی تمیز با زبری سطح μμπ (تکیه گاه 1 از جدول 4) تحت بار وارده N 80000 را نشان می دهد. توزیع دما در تکیه گاه ساخته شده از پلیمر تحت بار N 80000 (تکیه گاه 8 از جدول 4) نیز در "شکل 13b" نشان داده شده است.

جدول 5 متوسط شار حرارتی عبوری از قسمتهای فولادی و پلیمری تکیهگاه داخلی مرکب و نیز کل گرمای عبوری از تکیهگاه برای شرایط تکیهگاه و بارگذاری مندرج در جدول 4 را نشان می دهد. ردیفهای 1 و 7 از جدول 5 گرمای عبوری از تکیهگاه مرکب و پلی آمید را در شرایط بارگذاری استاتیک مخزن و تحت بار N 0000 نشان می دهد. از آن جایی که قسمت فولادی تکیهگاه مرکب در بارگذاری استاتیک درگیر می شود کل گرما از قسمت پلیمری آن عبور می کند.

"شکل 14" گرمای انتقال یافته از تکیهگاه داخلی مرکب ساخته شده از ورقههای فولادی با زبری سطح 1μm ,2μm ,3μm و μμm پوشیده با غبار اکسید فلز و تکیهگاه پلیمری تحت بار Ν 80000 را نشان میدهد.

جدول 4 مشخصات مدل های المان محدود تکیهگاه داخلی و شرایط بارگذاری آن ها **Table 4** Characteristics and loading conditions of finite element models of the internal supports

بار تکیهگاه (N)	زبري سطح صفحات استيل	نوع تكيهگاه	رديف
20000	1μm	Composite	1
80000	1μm	Composite	2
120000	1μm	Composite	3
80000	2μm	Composite	4
80000	3μm	Composite	5
80000	1μm-dusted	Composite	6
20000	-	Poly amide	7
80000	-	Poly amide	8
120000	-	Poly amide	9



90.027 <u>112.622</u> <u>135.241</u> <u>157.86</u> <u>180.479</u> <u>203.098</u> <u>225.717</u> <u>270.955</u> <u>293.574</u>



90.004 113.242 136.484 159.726 182.968 206.21 229.452 252.694 275.936 299.178 **Fig. 13** Temperature distribution at internal support a) made from

polymer and SS304 clean layers by  $1 \mu m$  surface roughness and b) made from poly amide, under 80000 N loading

شکل 13 توزیع دما در تکیهگاه a) مرکب باورق های فولادی بدون غبار و زبری سطح ۱µm و b) تمام پلیمری ساخته از پلیآمید، تحت نیروی وارده N 80000

همانطورکه در "شکل 14" مشاهده می شود استفاده از غبار اکسید فلز بین ورقههای فولادی انتقال حرارت از تکیه گاه مرکب را بیش از دو برابر کاهش می دهد. همچنین انتقال گرما از تکیه گاه تمام پلیمری در بار N0000 از تکیه گاه مرکب پیشنهادی با ورقههای دارای اکسید فلز در حدود 3.4 برابر کمتر است.

مقایسه تکیهگاه مرکب پیشنهادی در این تحقیق با تکیهگاه ساخته شده از پلیآمید نشان می دهد که در بارگذاری استاتیک مخزن استفاده از تکیهگاه مرکب انتقال حرارت را در حدود 5.3 برابر نسبت به تکیهگاه تمام پلیمری کاهش می دهد. در بارهای بیشتر که مربوط به بارگذاری دینامیک حاصل از شوک و لرزش است انتقال حرارت از تکیهگاه پیشنهادی در کمترین حالت 3.4 برابر بیشتر از تکیهگاه پلیمری است. اما کوتاه بودن مدت زمان این بارگذاری (در حدود چندین میلی ثانیه) در مقایسه با کل زمان درگیری

**جدول 5** شار حرارتی متوسط و کل گرمای عبوری محاسبه شده برای تکیهگاهها و شرایط بارگذاری جدول 4

 Table 5 Calculated average heat flux and heat flow through the internal supports and loading condition detailed in table 3

	6		
کل شار حرارتی	فلاکس حرارتی از طریق	فلاکس حرارتی از طریق	
تکیهگاه (W)	(W/m <sup>2</sup> ) پليمر	صفحات استيل (W/m <sup>2</sup> )	رديف
0.3474	177	0	1
13.85	268	3030	2
20.31	258	4500	3
11.42	272	2475	4
10.15	274	2185	5
6.271	281	1300	6
1.826	287	-	7
1.832	288	-	8
1.839	289	-	9

Progress, pp. 3-15, Springer Science & Business Media, 2007.

- [2] E. Lisowski, "Simulation and experimental research of internal supports in mobile cryogenic tanks", Czasopismo Techniczne. *Mechanika Czasopismo Techniczne. Mechanikal Transactions Mechanics*, 2010.
- [3] K. L. E. Lisowski, W. Czyżycki, Using of polyamide in construction of supporting blocks of cryogenic tanks on example of LNG container, *Archives* of Foundry Engineering, Vol. 10, No. 3, pp. 81–86, 2010.
- [4] R. P. Miksell, R. B. Scott, Heat conduction through insulating supports in very low temperature equipment, *Journal of Research of the National Bureau of Standards*, Vol. 57, No. 6, pp. 371–378, 1956.
- [5] W. Czy, modeling of heat flow through multilayer internal supports of cryogenic vessels, *Czasopismo Techniczne Mechanika*, Vol. 7, No. 2, pp. 27– 34, 2015.
- [6] E. Lisowski, W. C. I, Transport and storage of lng in container tanks, *Journal of KONES*, Vol. 18, No. 3, pp. 193–201, 2011.
- [7] K. Nishino, Thermal contact conductance under low applied load in a vacuum environment, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 10, No. 2, pp. 258–271, 1995.
- [8] V. Singhal, P. Litke, A. Black, S. Garimella, An experimentally validated thermo-mechanical model for the prediction of thermal contact conductance,*International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 48, No. 25–26, pp. 5446–5459, Dec. 2005.
- [9] M. Sridhar, M. Yovanovich, Thermal contact conductance of tool steel and comparison with model, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 39, No. 4, pp. 831–839, 1996.
- [10] P. Sadowski, S. Stupkiewicz, A model of thermal contact conductance at high real contact area fractions, *Wear*, Vol. 268, No. 1–2, pp. 77–85, 2010.
- [11] A. Hamasaiid, G. Dour, T. Loulou, M. Dargusch, A predictive model for the evolution of the thermal conductance at the casting-die interfaces in high pressure die casting, *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 49, No. 2, pp. 365–372, 2010.
- [12] M. Bahrami, M. Yovanovich, J. Culham, Thermal contact resistance at low contact pressure: Effect of elastic deformation, *International Journal of Heat* and Mass Transfer, Vol. 48, No. 16, pp. 3284–3293, Jul. 2005.
- [13] Technical data sheet: Torlon 4203L– Polyamide-imide, Accessed on 15 oct 2017; http://www.solvay.com/en/search/global-search. html
- [14] Technical data sheet : polystyrene , Accessed on 15 oct 2017; https://www.makeitfrom.com/material-properties/Polystyrene-PS.
   [15] Product information: Tecamax SRP, Accessed on 15 oct 2017;
- http://sdplastics.master.com/texis/master/search/?q=Tecamax+SRP.
- [16] A. L. Woodcraft, V. Martelli, G. Ventura, Thermal conductivity of Tecamax SRP from millikelvin temperatures to room temperature, *Cryogenics (Guildf)*, Vol. 50, No. 2, pp. 66–70, 2010.
- [17] M. Cooper, B. Mikic, M. Yovanovich, Thermal contact conductance, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 12, pp. 279–300, 1969.
- [18] M. Bahrami, Modeling of Thermal Joint Resistance for Sphere-Flat Contacts in a Vacuum, PhD thesis, University of Waterloo, Waterloo, 2004.
- [19] M. Bahrami, J. R. Culham, M. M. Yovanovich, G. E. Schneider, Thermal contact resistance of nonconforming rough surfaces, part 1: contact mechanics model, *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, Vol. 18, No. 2, pp. 209–217, Apr. 2004.
- [20] Williamson, J. B., Pullen, J., Hunt, R. T., and Leonard, D., "The Shape of Solid Surfaces," Surface Mechanics, ASME, New York, 1969, pp. 24—35.
- [21] V. Norouzifard, Experimental Study of Thermal Contact in Tool-Chip Interface and Presenting an Approach to Determine Thermal Contact Conductance, PhD thesis, university of Tehran, Tehran, 2014. (in Persian, فارسی)
- [22] J. A. Greenwood, J. B. P. Williamson, Contact of Nominally Flat Surfaces, Proceedings of the Royal Society of London, A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, Vol. 295, No. 1442, pp. 300–319, Dec. 1966.
- [23] D. Tabor, Hardness of Metals, pp. 25–56, Oxford: Oxford University Press, 1951.
- [24] T. S. DeSisto, F. L. Carr, Low temperature mechanical properties of 300 series stainless steels and titanium, *Advances in Cryogenic Engineering*, Vol 6, pp 577-586, Dec. 1961.
- [25] M. Mathew, K. Shenoy, K. S. Ravishankar, Vickers hardness and specific wear rate of poly propylene reinforced PMMA, *International Journal of Scientific Study*, Vol. 2, No. 3, pp. 71–75, 2014.



Fig. 14 Heat flow through composite internal supports with SS304 layers by 1 $\mu$ m, 2 $\mu$ m, 3 $\mu$ m roughness and 1 $\mu$ m-dusted and poly amide under 80000 N loading

شکل 14 گرمای انتقال یافته از تکیهگاه داخلی مرکب ساخته شده از ورقههای فولادی با زبری سطح μm ,2μm ,2μm و μμ پوشیده با غبار اکسید فلز و تکیهگاه پلیمری تحت بار 80000 N

تکیهگاه و تحمل بهتر تنشهای حاصل، استفاده از تکیهگاه مرکب حاضر را نسبت به تکیهگاه پلیمری توجیه میکند.

#### 5- نتیجه گیری

در این مقاله یک تکیهگاه جدید مرکب جهت استفاده در مخازن برودتی پیشنهاد گردید. در این طرح، تکیهگاه از دو قسمت پلیمری و فولادی چند لایه ساخته شده است. برای محاسبه میزان دقیق مقاومت حرارت تماسی بین توزیع تنش و شار حرارتی در تکیهگاه پیشنهادی یک مدل المان محدود مکانیکی-حرارتی ایجاد گردید و حل آن به کمک کد المان محدود انسیس انجام شد. نتایج المان محدود شامل توزیع دما، شار حرارتی عبوری و توزیع کاهش میزان شار حرارتی از تکیهگاه مرکب پیشنهادی را با افزودن اکسید فلز بین ورقههای فولادی را نشان داد. همچنین، در بارگذاری استاتیک و بین ورقههای فولادی را نشان داد. همچنین، در بارگذاری استاتیک و بیشتر از تکیهگاه پلیمری انتالی از تکیهگاه مرکب به ترتیب بسیار کمتر و بیشر ای تکیهگاه پلیمری استان داد. همچنین، در بارگذاری استاتیک و بیشتر از تکیهگاه پلیمری استان داد. همچنین، در بارگذاری استاتیک و بیشتر از تکیهگاه پلیمری است. اما با در نظر گرفتن این که مدت زمان بارگذاری دینامیک در مقایسه با زمان کل بسیار کوتاه است کل گرمای انتقالی از تکیهگاه مرکب در یک دوره زمانی مشخص از کارکرد مخزن کمتر از تکیهگاه ساخته شده از پلیمر خواهد بود.

#### 6- مراجع

[1] E. Timmerhaus, D. Klaus, R. Reed, Cryogenic Engineering: Fifty Years of