



## بهینه سازی سازه محفظه دمش لیزر یاق-نئودیمیم تحت بار حرارتی و مکانیکی جهت آب بندی سطوح لپن کاری شده

**چکیده:** محفظه دمش لیزر یاق-نئودیمیم در اثر عبور پرتو لیزر داغ شده و استحکام آن نیازمند غلبه بر تنشهای حرارتی و حفظ خواص مکانیکی ماده می باشد. برای جلوگیری از انباشت حرارت، محفظه توسط کانال آب خنک کاری می شود. در این تحقیق آب بندی کانال با توجه به شرایط خاص و لزوم عدم مزاحمت برای عبور پرتو، به صورت اعمال نیرو در دو فک واقع در دو انتهای یاق انجام می شود. با افزایش نیروی اعمالی، کیفیت آب بندی افزایش می یابد ولی لزوم جلوگیری از شکست قطعات، این افزایش نیرو را محدود می سازد. محاسبه آرایش بهینه اعمال نیروها برای بیشینه نیرویی های اعمالی به سیستم با لحاظ قیود هندسی و رفتاری جهت بیشینه کردن عملکرد آب بندی جنبه نوآوری این تحقیق است. مدل پارامتری یاق استخراج شد و با تحلیل های هدفمند، مدلی با توزیع یکنواخت تنش به دست آمد که منجر به طراحی مدل با ماکزیمم نیروی قابل اعمال گردید. بیشینه نیروی مورد اعمال برای آب بندی ۴۰۱ نیوتن محاسبه شد. نسبت نیرویی بهینه در پیچ های فک برابر ۶۰ درصد بدست آمد. روش ارائه شده، با کاهش احتمال شکست، کاهش هزینه و افزایش عملکرد آب بندی را در پی داشته و قابلیت استفاده در موارد مشابه را دارد.

**واژه های راهنما:** لیزر یاق-نئودیمیم، محفظه دمش، افزایش عملکرد آب بندی، استحکام سازه، بهینه سازی

بهروز شهریاری\*

دانشیار

حسن ایزانلو

کارشناسی ارشد،

مجتمع دانشگاهی مکانیک،

دانشگاه صنعتی مالک اشتر

مقاله علمی پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۳/۰۱/۱۲

بازنگری: ۱۴۰۳/۰۷/۰۶

پذیرش: ۱۴۰۳/۰۹/۲۷

Behrooz Shahriari\*  
Associate Professor

Hassan Izanlo  
M.Sc., Faculty of  
Mechanics, Malek Ashtar  
University of Technology

## Structural optimization of Nd:YAG laser chamber under thermal and mechanical loads for sealing of the lapped surfaces

**Abstract:** The Nd:YAG laser chamber is heated due to the passage of the laser beam and its strength requires overcoming thermal stresses and maintaining the mechanical properties of the material. To prevent heat accumulation, the chamber is cooled by a water channel. In this research, the sealing of the channel is done by applying force in two clamps located at the YAG, according to the special conditions and the necessity of not disturbing the passage of the beam. By increasing the applied force, the quality of sealing increases, but the need to prevent the failure of parts limits this increase in force. Calculating the optimal arrangement of forces for the maximum forces applied to the system in terms of geometrical and behavioral constraints to maximize the sealing performance is the innovative aspect of this research. The YAG parametric model was extracted and with targeted analysis, a model with uniform stress distribution was obtained, which led to the design of the model with the maximum applicable force. The maximum force used for sealing was calculated to be 401N. The optimal force ratio in screws was 60%. By reducing the probability of failure, the presented method reduces the cost and increases the sealing performance and can be used in similar cases.

**Keywords:** Nd:YAG laser, Laser chamber, Increasing sealing performance, Structural strength, Optimization

## ۱- مقدمه

می‌باشد. استفاده از سیستم خنک کاری و بارگذاری و تحلیل سازه مجموعه محفظه دمش لیزر جهت جلوگیری از شکست اجزای محفظه دمش ضرورتی انکارناپذیر است. تحلیل پارامتری و بهینه‌سازی هندسی سازه محفظه دمش یک راهکار مناسب برای حل این مشکل است.

برای آب‌بندی سطوح صلب معمولاً از لایه‌های از جنس نرم استفاده می‌شود که تغییر فاصله محدود بین سطوح آب‌بندی شونده را موجب می‌شود. در بسیاری از قطعات مهندسی نظیر یاق‌های محفظه دمش لیزر، لازم است که ضمن ایجاد آب‌بندی مناسب بین اتصال قطعه صلب به صلب (مثلاً فلز به شیشه)، وضعیت دقیق قطعات در گیر همنشین حفظ گردد. اتصالات صلب را می‌توان به روش‌های مختلفی آب‌بندی نمود. اتصالات دائمی یا به ندرت بازشونده را با مواد آب‌بندساز (درزبند) از قبیل باکلیت‌ها، سرنج و شیشه مایع و نظایر آن آب‌بندی می‌کنند. به هنگام محکم کردن اتصال، مقدار اضافی درزبند از سطح جدایش بیرون زده و تنها فیلم نازکی با ضخامت چند میکرون یا چند صدم میلی‌متر در جا باقی خواهد ماند. این فیلم در عمل هیچ‌گونه تأثیر منفی بر روی دقت وضعیت متقابل قطعات متصل شونده برجا نمی‌گذارد. واحدهایی که با استفاده از ماده درزبند به هم متصل می‌شوند به ویژه بعد از کار در درجه حرارت‌های بالا، به سختی دمونتاژ می‌شوند و باید در این‌گونه واحدها وسایل بیرون کش مناسب را تدارک دید. اگر قطعات صلب آب‌بند شونده، فلز و شیشه بوده و علاوه بر دقت وضعیت قطعات و در معرض دمای بالا بودن، نیاز به باز و بسته شدن به مراتب زیاد باشند استفاده از درزبند مناسب نیست؛ لذا این اتصالات دقیق، از طریق پرداخت ظریف سطوح آب‌بند شونده یعنی لپ‌کاری (لپینگ<sup>۱</sup>) آب‌بند می‌شوند [۳].

فرآیند لپ‌کاری، نوعی فرآیند پرداخت کاری ظریف است که معمولاً جهت پرداخت کاری نهایی مورد استفاده قرار می‌گیرد؛ برداشت ماده در این فرآیند به وسیله ذرات ساینده‌های که با سیالی مخلوط شده و بین ابزار لپ‌کاری و قطعه کار ریخته یا مالیده می‌شوند، انجام می‌شود [۴]. برخی از مهمترین اهداف استفاده از فرآیند لپ‌کاری تخت یک‌طرفه در تولید قطعات، افزایش تختی و کاهش زبری سطح قطعات تولیدشده است. افزایش تختی و کاهش زبری سطح تأثیر بسیار زیادی بر افزایش عمر، کارایی و عملکرد صحیح قطعات تولیدی دارند و سبب کاهش اصطکاک و افزایش آب‌بندی می‌گردند [۵]. پژوهشگران تعریف‌های متنوعی از فرآیند لپ‌کاری ارائه کرده‌اند که تعریف

تنش‌های حرارتی، تنش‌هایی هستند که وقتی تغییر دمای ماده در حضور قیود اتفاق می‌افتد به وجود می‌آیند. تنش‌های حرارتی در حقیقت تنش‌های مکانیکی هستند که در اثر نیروهای ناشی از قطعه‌ای که مقید شده و سعی در انبساط یا انقباض دارد به وجود می‌آیند. بدون قیدها، تنش‌های حرارتی وجود نخواهد داشت. از دیدگاه تنش‌های حرارتی، دو نوع قید وجود دارد: (الف) قیود خارجی و (ب) قیود داخلی. قیود خارجی محدودیت‌های روی کل سیستم هستند که وقتی تغییر دما اتفاق می‌افتد از انبساط و انقباض سیستم جلوگیری می‌کنند. قیود داخلی محدودیت‌های هستند که به دلیل این که جسم در اثر حرارت در مکان‌های مختلف از آن به اندازه‌های مختلف منبسط یا منقبض می‌شود و با این وجود جسم باید یکپارچگی (پیوستگی) خود را حفظ کند درون جسم ظاهر می‌شوند. تنش حرارتی در بسیاری از موارد وابستگی کمی به ابعاد قطعه داشته و یا حتی مستقل از ابعاد قطعه هستند. در مواجهه با تنش‌های حرارتی، طراح حداقل سه راه حل را می‌تواند در نظر بگیرد: (الف) انتخاب مواد؛ (ب) محدودیت تغییرات دما؛ (ج) آزادسازی قیود [۱].

افزایش دما باعث کاهش استحکام مواد در مقابله با بارهای وارده می‌شود. با افزایش دما، خواص الاستیک مواد مانند مدول یانگ به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد و رفتارهای متناسب با زمان مانند خزش در سازه نمایان می‌شود. علاوه بر این تنش‌های حرارتی نیز در سازه برای جلوگیری از انبساط و یا انقباض حرارتی کلی و یا محلی بوجود می‌آیند. این تنش‌ها تغییر شکل سازه را افزایش داده و بارهای کماتش را تغییر می‌دهند. یکی از تجهیزات در مهندسی لیزر، محفظه دمش لیزر یاق-نئودیم است که تحت دمای بالا قرار داشته و نیازمند خنک‌کاری است. این محفظه به دلیل حضور دما و گرادیان حرارتی تحت بارهای حرارتی قرار دارد. این تجهیز در درمان بیماری‌های پوست و رگ و دیگر نیازهای پزشکی، صنعتی و نظامی کاربرد دارد [۱]. این نوع از لیزرها دارای قطعات حساسی مانند کوارتز می‌باشند که یکی از مهم‌ترین و پراستفاده‌ترین عناصر در ساخت عدسی و وسایل اپتیکی هستند و در ساخت محفظه دمش لیزر مورد استفاده قرار می‌گیرند. شیشه کوارتز دارای ویژگی‌های نفوذپذیری، سختی، مقاومت حرارتی بالا، خلوص شیمیایی، ضریب انبساط حرارتی مناسب، عایق الکتریکی، مقاومت بالا در برابر خوردگی، انتقال نوری گسترده

<sup>1</sup> Lapping

بهینه‌سازی یک قطعه مکانیکی استفاده کردند. آن‌ها مدل را شبکه‌بندی کرده و از حالت پیوسته به گسسته تبدیل کردند. با توجه به این‌که مدل به صورت گسسته است، از الگوریتم ژنتیک استفاده نموده و تابع برازش و مدل بهینه شده را استخراج نموده و در نهایت مدل بهینه شده را به صورت قابل ساخت اصلاح کردند. در یک مطالعه، لیو و همکاران [۱۳] سازه عایق مورد استفاده در رینگ الکترواستاتیک ترانسفورماتور را با استفاده از روش سطح پاسخ بهینه‌سازی کردند. ایشان ابتدا عایق را در نرم‌افزار انسیس مدل‌سازی کردند، سپس با استفاده از روش تاوچی پارامترهایی که بیشترین تأثیر را در شدت میدان الکتریکی دارند را شناسایی نمودند تا فرایند بهینه‌سازی با سرعت بیشتری انجام گردد. سپس تعدادی نقاط آزمون توسط روش طراحی ترکیبی مرکزی<sup>۴</sup> (CCD) ساخته شد و سطح پاسخ توسط نرم‌افزار انسیس و متلب<sup>۵</sup> محاسبه و ترسیم گردید.

تان فنگ و همکاران [۱۴] اثرات انحنای لبه، ارتفاع لبه و ضخامت لبه را بر عملکرد آب‌بندی و بهینه‌سازی پارامترهای سازه‌ای آب‌بند لبه‌ای مورد مطالعه قرار دادند. لیو و همکاران [۱۵] سازه آب‌بندی شیار مثلثی روی کابین بزرگ یک زیردریایما را مطالعه کردند. آنها با مدل تماس آب‌بند به صورت مدل المان محدود غیرخطی و نشان دادند عملکرد آب‌بند اصولاً به مقدار و توزیع تنش تماسی وابسته است و وقتی که تنش تماسی از فشار آب فراتر رود آب‌بند نشتی نخواهد داشت. به علاوه وقتی عرض تماس موثر بزرگتر از عرض فشار آب باشد تنش تماسی بیشینه هم فراتر از فشار آب خواهد رفت. به عبارتی هرچه اختلاف فشار آب‌بندی موثر بیشتر باشد عملکرد آب‌بندی بیشتر می‌شود.

ما و همکاران [۱۶] یک مدل عددی جامع جدید از مهر و موم فلزی مته‌ها ایجاد شده است. چگونگی پیش‌بینی دقیق عملکرد آب‌بندی سیل‌های فلزی را بررسی کردند و به بهینه‌سازی عملکرد کلی آب‌بندی تحت تأثیر عوامل مختلف پرداختند.

ژیوپنگ لیو و همکاران [۱۷] در مطالعه آب‌بندی فضای داخلی مخازن تحت فشار اعماق دریا، با استفاده از نرم‌افزار المان محدود انسیس، یک مدل المان محدود آب‌بند لبه‌ای دو بعدی متقارن را ایجاد کردند که از نیروها برای قیود سراسری استفاده می‌کند. آنها کل فرآیند فشار پیش رونده در شیار آب‌بندی و همچنین تغییر شکل، تنش تماسی، حداکثر تنش برشی و توزیع تنش فون میزز را شبیه‌سازی کردند. آنها یک تحلیل مقایسه‌ای

معمول آن عبارت از مالش تصادفی قطعه‌کار در مقابل صفحه‌لپ که از قطعه‌کار نرم‌تر است و استفاده همزمان از مخلوط ساینده جهت بهبود پرداخت و انطباق سطوح می‌باشد [۶ و ۷]. مواد ساینده لپن‌کاری متنوع می‌باشند؛ بیش از همه گرد شیشه (کاربید سیلیسیم)، کرواندوم (بلور اکسید آلومینیوم)، کاربید بر و الماس (برای فلزات سخت) استفاده می‌شود. از روغن ماشین، نفت و اسیدهای چرب می‌توان به عنوان مواد روان‌ساز استفاده نمود. لپن‌کاری یک فرآیند پرهزینه و پرکار می‌باشد؛ لذا آن را تنها در اتصالات مهم و حساس به کار می‌برند. سفتی و نزدیکی مناسب پیچ‌های اتصال دهنده جهت آب‌بندی مطمئن یک پیش‌شرط ضروری می‌باشد [۳]. فلزات، سرامیک، شیشه، مواد طبیعی مانند سنگ مرمر، گرانیت، بازالت، هر نوع جواهر، پلاستیک، مواد مورد استفاده در فناوری نیمه هادی و همچنین کربن، گرافیت و حتی الماس را می‌توان با لپن‌کاری پرداخت نمود [۸].

تونگ کویی و همکاران [۹] به بررسی نیروی آب‌بندی مواد الاستومری درزگیر مورد استفاده برای پیل سوختی غشای تبادل پروتون<sup>۱</sup> تحت چرخه دما پرداختند. آنها رهایی تنش و تنش حرارتی ماده آب‌بند لاستیک سیلیکون مایع<sup>۲</sup> تحت سیکل دما را مورد بحث قرار دادند و مشخص کردند که انبساط یا انقباض حرارتی عامل اصلی تنش فشاری ایجاد شده در این آب‌بند است. یونگ و همکاران [۱۰] اتصالات رزوه‌ای لوله‌های مته آب‌بندی گاز که در معرض چرخش‌های مختلف سفت شدن و بار کششی قرار دارند را با استفاده از مدل‌سازی اجزا محدود پیچیده مورد تحلیل قرار دادند. آنها مدل مکانیکی مربوطه را ایجاد کردند و قابلیت اطمینان مدل را با شبیه‌سازی اجزا محدود و آزمون مقیاس کامل صحت‌سنجی نمودند.

در یک مطالعه، رمش و همکاران [۱۱]، توپولوژی یک پایه موتور را با استفاده از نرم‌افزار المان محدود انسیس بهینه‌سازی کردند. آن‌ها ابتدا پایه موتور را مدل‌سازی کردند سپس با استفاده از تحلیل‌های مختلف مانند تحلیل استاتیکی، تحلیل مودال، تحلیل پاسخ هارمونیک، پایه موتور را مدل‌سازی المان محدود نمودند. ایشان از تحلیل پاسخ هارمونیک در راستای محاسبه تغییر شکل‌های سیستم تحت بار با فرکانس طبیعی سیستم، استفاده کردند. سپس در محیط بهینه‌سازی توپولوژی، پایه موتور را بهینه‌سازی ساختاری کردند. در مطالعه دیگر گاتزی و همکاران [۱۲]، از روش الگوریتم ژنتیک در نرم‌افزار انسیس<sup>۳</sup> برای

<sup>4</sup> Central Composite Design (CCD)

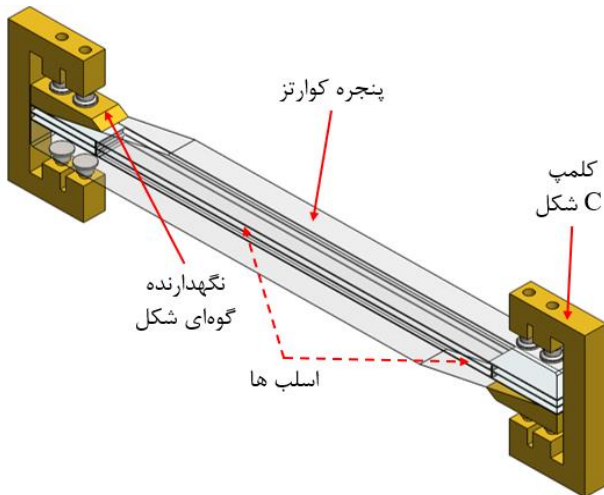
<sup>5</sup> MATLAB

<sup>1</sup> Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC)

<sup>2</sup> Liquid Silicone Rubber (LSR)

<sup>3</sup> Genetic Algorithm ANSYS (GA-ANSYS)

داشته باشد، نرم افزار سالیدورکس انتخاب می شود. سازه لیزر به صورت کامل مدل سازی شده و جنس و خواص قطعات در نرم افزار اعمال می شوند. شکل (۱) قسمت یاگ محافظه دمش لیزر را با ارائه جزئیات نشان می دهند. یاگ در مرکز هندسه محافظه دمش قرار دارد و حساس ترین بخش آن از دیدگاه سازه ای است. قسمت های اصلی لیزر شامل بدنه، یاگ و قسمت خنک کاری، پخش کننده جریان خنک کاری و مجاری مربوط به جریان سیال است.



شکل ۱ سازه یاگ در محافظه دمش لیزر یاگ-نئودیمیم

در جدول (۱) خواص یاگ و کوارتز ارائه شده است. یاگ دارای اهمیت به مراتب بیشتری نسبت به سایر بخش های محافظه دمش لیزر می باشد. بنابراین محوریت بهینه سازی محافظه دمش لیزر در مطالعه حاضر مربوط به بخش یاگ آن می باشد. کلمپ های نارنجی رنگ به شکل C و همچنین نگه دارنده گوه ای در شکل نیز از برنج ساخته شده اند.

جدول ۱ خواص ماده سازنده یاگ

خواص مکانیکی	مقدار	واحد
مدول الاستیک	۳۱۰۰۰۰	$N/mm^2$
ضریب پواسون	۰/۳	
مدول برشی	۴۰۰۰۰	$N/mm^2$
چگالی	۴۵۶۰	$kg/m^3$
استحکام کششی	۲۰۰	$N/mm^2$
استحکام فشاری	۱۱۵۰	$N/mm^2$
استحکام تسلیم	۱۹۵	$N/mm^2$
ضریب انبساط حرارتی	۰/۰۰۰۰۰۷۸	$1/k$
هدایت حرارتی	۱۴	$W/(m.k)$

از آب بند لبه ای در شرایط آب بندی با فشار آب کم و بالا انجام دادند. یافته های این مطالعه نشان می دهد که وقتی آب بند تحت تأثیر ترکیبی از نیروی پیش بار نصب و فشار آب قرار می گیرد، آب بند لبه ای فشرده گی کاملی را در شیار آب بندی در عمق آب خاص تجربه می کند.

نلسون و همکاران [۱۸] آب بندی اتصال فلنج پیچ و مهره ای که در معرض عدم قطعیت های زیادی مانند غیر خطی بودن مواد و هندسی، توزیع بار و شل شدن قرار دارد را بررسی کردند. آنها، تأثیر عوامل بار پیچ، فشار داخلی سیال، دما و بارهای وابسته به موقعیت بر نشتی اتصالات فلنج پیچ و مهره ای را بررسی کردند. ایشان اهمیت تغییر در سفتی مفصل محوری به دلیل شل شدن بار پیچ در دمای بالا را مورد بحث قرار داده و به عملکرد آب بندی و پیش بینی میزان نشتی در شرایط بارگذاری مختلف پرداختند. همچنین آنها ظرفیت باربری و معیارهای شکست اتصال فلنج، همراه با اثر تاریخچه بارگذاری را مورد بحث قرار دادند. در این تحقیق آنها چالش ها و زمینه های بهبود دستیابی به اتصال فلنج بدون نشتی و عدم شکست سازه سالم را در این مقاله مروری بررسی نمودند.

یانگ لیو و همکاران [۱۹] علل اصلی خرابی آب بند فلزی را مورد مطالعه قرار داده و معیارهای اصلی برای شکست سازه آب بند فلزی بر اساس ویژگی های سازه ای را بیان کردند. آنها تحلیل مکانیکی بر روی فرآیند مونتاژ و فشرده سازی آب بندهای فلزی انجام داده و رابطه نظری فشارهای تماس سطح آب بندی دینامیکی آب بندهای فلزی را به دست آوردند و سازه آب بند را برای قابلیت اطمینان بالاتر و عمر طولانی بهبود دادند.

در مطالعه حاضر با استفاده از تحلیل سازه ای و پارامتری و روش بهینه سازی، سازه محافظه دمش یک لیزر بهینه سازی هندسی و نیرویی می شود. در این راستا با استفاده از ترکیب نرم افزارهای طراحی و المان محدود، مدل طراحی شده تحلیل و بهینه سازی می گردد. از نوآوری های مطالعه حاضر می توان به ارائه یک روش مناسب در راستای بهینه سازی سازه ای و نیرویی جهت آب بندی سیستم های حساس اشاره کرد. با استفاده از روش مورد استفاده در مطالعه حاضر می توان سیستم های حساسی مانند محافظه دمش لیزر و دیگر سیستم های دارای ساختار شکننده را تحلیل و بهینه سازی کرد.

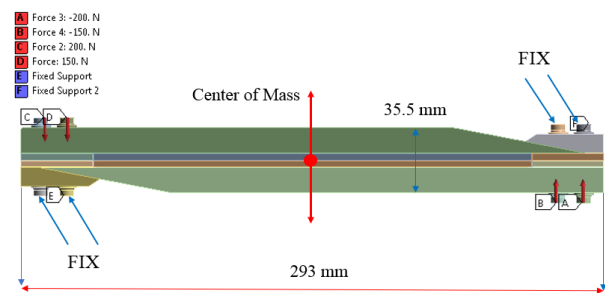
## ۲- مدل سازی پارامتری یاگ محافظه دمش لیزر

نظر به این که نرم افزار مدل سازی سه بعدی قابلیت طراحی پارامتری مناسب و کوپل شدن با نرم افزارهای المان محدود را

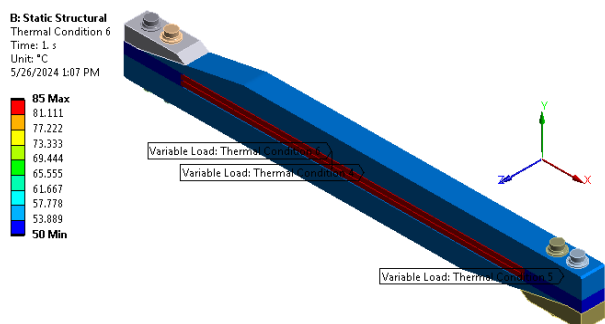
### ۳- تحلیل سازه یاگ در محفظه دمش لیزر

بخش‌های مهم تحلیل سازه‌ای یاگ به شرح ذیل می‌باشد:

- انتقال مدل از نرم‌افزار طراحی به نرم‌افزار تجاری انسیس (کوپل نرم‌افزار سالدورکس و نرم‌افزار انسیس)
- اعمال قیود تکیه‌گاهی ثابت و اعمال بارگذاری به سیستم: در این مورد مسئله تقارن باید در نظر گرفته شود؛ زیرا یاگ نسبت به صفحه میانی متقارن نیست. تقارن یاگ نسبت به مرکز ثقل آن می‌باشد؛ این مسئله در دقت نهایی بسیار تأثیرگذار خواهد بود و در شکل (۳) نشان داده شده است.
- در اعمال برهم‌کنش‌های بین قطعات یاگ، تمامی اتصالات بین قطعات نازک و دیگر قطعات یاگ اصطکاکی در نظر گرفته می‌شود. ضریب اصطکاک بین قطعات ۰/۴ مانند ضریب اصطکاک دو شیشه روی یکدیگر در نظر گرفته می‌شود. نکته مهم در این تحلیل این است که با ثابت در نظر گرفتن برهم‌کنش‌ها به جای اصطکاکی، فنریت سیستم به شدت افزایش یافته و نتایج تحلیل المان محدود غیر واقعی خواهد بود. در مجموع ۶۱ برهم‌کنش اصطکاکی بین قطعات سازه یاگ تعریف شده است.
- اعمال دمای قطعات مختلف یاگ به منظور در نظر گرفتن تنش‌های حرارتی در سازه است. با توجه به وجود قیود مکانیکی و مقاومت سازه در مقابل تغییر شکل‌ها، ایجاد تنش‌های حرارتی ایجاد می‌شوند. این مسئله در شکل (۳) نشان داده شده است. شکل (۴) دمای قسمت‌های مختلف سازه یاگ را نشان می‌دهد که ورودی تحلیل می‌باشند.



شکل ۳ بارگذاری و شرایط مرزی سیستم یاگ

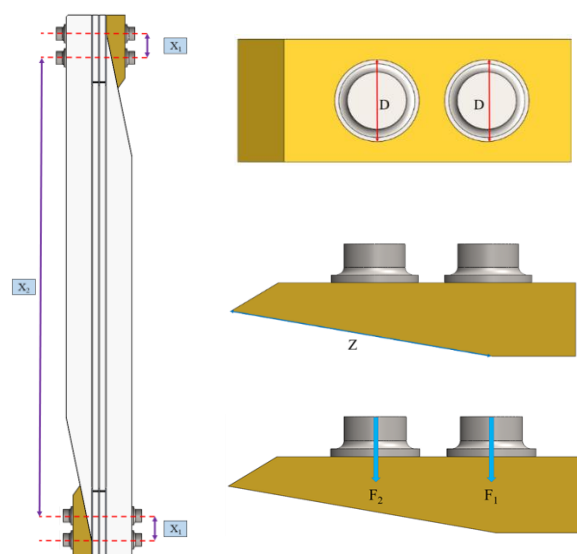


شکل ۴ شرایط دمایی مختلف قطعات حساس یاگ

جدول ۲ خواص ماده کوآرتز مورد استفاده در لیزر

خواص مکانیکی	مقدار	واحد
مدول الاستیک	۷۲۵۰۰	$N/mm^2$
ضریب پواسون	۰/۱۷	
مدول برشی	۳۱۰۰۰	$N/mm^2$
چگالی	۲۲۰۰	$kg/m^3$
استحکام کششی	۵۰	$N/mm^2$
استحکام فشاری	۱۱۵۰	$N/mm^2$
استحکام تسلیم	۳۰	$N/mm^2$
ضریب انبساط حرارتی	۰/۰۰۰۰۰۰۵	$1/k$
هدایت حرارتی	۱/۴	$W/(m.k)$

در راستای بهینه‌سازی هندسی سازه، ابعاد سازه مدل‌سازی شده در نرم‌افزار سالدورکس پارامتری‌سازی می‌شوند. نظر به این‌که تعداد زیادی از اندازه‌های مورد استفاده در طراحی یاگ غیر قابل تغییر می‌باشند (مانند ضخامت یاگ و طول آن) اندازه‌هایی مانند قطر نگه‌دارنده‌های فک‌ها، ابعاد فک و فواصل بین نگهدارنده‌های فک‌ها پارامتری‌سازی می‌شوند. شکل (۲) پارامترهای مهم در مدل‌سازی پارامتری سازه محفظه دمش لیزر یاگ-نئودیم را نشان می‌دهد. نکته مهم در طراحی پارامتری این است که ابعاد پارامتری می‌توانند تغییرات کمی در طول بهینه‌سازی داشته باشند و سعی می‌شود تا تنش ماکزیمم کاهش یابد و در قطعات نازک، اختلاف تنش ماکزیمم و مینیمم کاهش پیدا کند. با توجه به این‌که این قطعات نازک هستند، این فرایند موجب کاهش گرادبان تنش و در نتیجه یکنواخت‌تر شدن تنش خواهد شد.



شکل ۲ پارامتری‌سازی هندسه و بار سازه یاگ در محفظه دمش لیزر

حالت مسئله غیرایستایی بوده است و نیاز به بررسی محدوده پایین تر از این وجود ندارد. چرا که در این حالت هیچ گونه آببندی وجود ندارد. در مطالعه حاضر این حالت برابر است با حالتی که نیروی معادل هر کلمپ برابر  $300\text{ N}$  باشد.

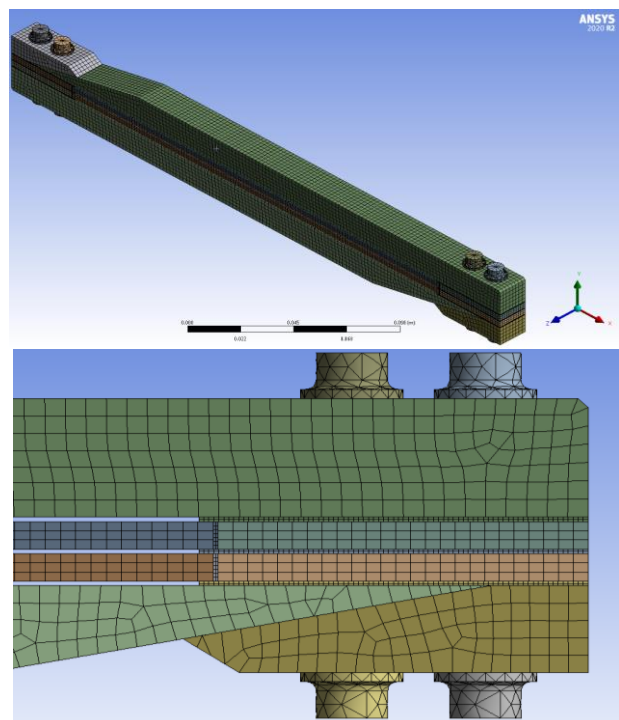
$F$  - بارگذاری در جایی خاتمه می یابد که سیستم در حالت پایدار باشد. اگر دو نیروی قرار داده شده فراتر از حالتی باشد که بارگذاری عمودی موجب تغییر شکل زیادی قطعات نازک و حساس شود این حالت نزدیک به حالت شکست قطعات حساس می باشد. در این حالت مسئله ناپایدار است و بررسی نمی شود؛ زیرا بارگذاری بیشتر از این حالت موجب شکست می شود. این حالت در مطالعه حاضر برای دو استراتژی  $(F_1 = 250\text{ N} \ \& \ F_2 = 151\text{ N})$  و  $(F_1 = 155 \ \& \ F_2 = 195)$  رخ می دهد.

استراتژی بارگذاری با ثابت در نظر گرفتن یک نیرو و افزایش نیروی دیگر بوده و با گام  $5\text{ N}$  برای نیروی دیگر است. حالت بهینه بارگذاری که هم شکستی رخ نمی دهد و هم آببندی بهتری انجام می شود برای حالت  $(F_1 = 250\text{ N} \ \& \ F_2 = 151\text{ N})$  است. به عبارت عددی نیروی  $F_2$  در حدود  $60\%$  درصد نیروی  $F_1$  است. برای ایجاد حاشیه امن در مدل واقعی، معیار  $60\%$  درصدی رعایت می گردد اما مجموع بارگذاری مدل واقعی کمتر از حالت عددی و نرم افزاری است. علت اختلاف نیرویی می شود به این دلیل باشد که  $F_1$  تقریباً به یک سطح صاف منتقل می شود اما نیروی  $F_2$  به یک سطح شیب دار انتقال می یابد. با توجه به تعادل نیروی، نیروی ایجاد شده روی سطح شیب دار افزایش بیشتری می یابد و باعث شکست در یاق می شود. در ادامه بهینه سازی هندسی انجام شود که در آن بارهای محاسبه شده از بهینه سازی نیرویی قرار داده می شود.

شکل (۷) نشان دهنده کانتور تنش و تغییرات تنش در قطعه بحرانی در دو راستای  $X$  و  $Y$  است.

در راستای بهینه سازی هندسی سازه لیزر، از قسمت بهینه سازی مستقیم در نرم افزار انسیس استفاده می شود. روش مورد استفاده در بهینه سازی Screening انتخاب می شود. تعداد محدوده بهینه سازی  $100$  در نظر گرفته می شود. نکته مهم در بهینه سازی این است که پیچ ها در طول بهینه سازی تقارن خود را حفظ می کنند. این کار با تنظیمات مربوطه در نرم افزار طراحی انجام می شود. در راستای بررسی چشم پوشی از ارتقاء یک هدف و بهبود اهداف دیگر از نمودار Trade-off استفاده می شود. در شکل (۸) این نمودار نشان داده شده است. نمودار مربوط به نمونه های بهینه سازی در شکل (۹) نشان داده شده است. به منظور بررسی حساسیت پارامترها در بهینه سازی از نمودار حساسیت استفاده می شود که در شکل (۱۰) نشان داده شده است.

نیروی مقابله با تغییر شکل قطعات، نیروی اصطکاکی ناشی از نیروی نگه دارندگی فک کلمپ ها می باشد. از هر فک، یک طرف به عنوان قسمت ثابت در نظر گرفته می شود که از لحاظ واقعیت درست می باشد چرا که آن قسمت کلمپ ها دارای قید حرکتی در جهت افقی می باشد. با توجه به اینکه سازه سیستم دارای هندسه منظمی می باشد، شبکه المان محدود اعمال شده به سیستم، شبکه مکعبی با  $20$  درجه آزادی می باشد. تعداد گره های المان برای محاسبات المان  $8$  می باشد. نوع شبکه از نوع خطی می باشد. در شکل (۵) شبکه بندی مدل سازه لیزر و قسمت های حساس آن نشان داده شده است. تعداد کل المان های مورد استفاده در تحلیل سازه قسمت یاق برابر  $70000$  می باشد.

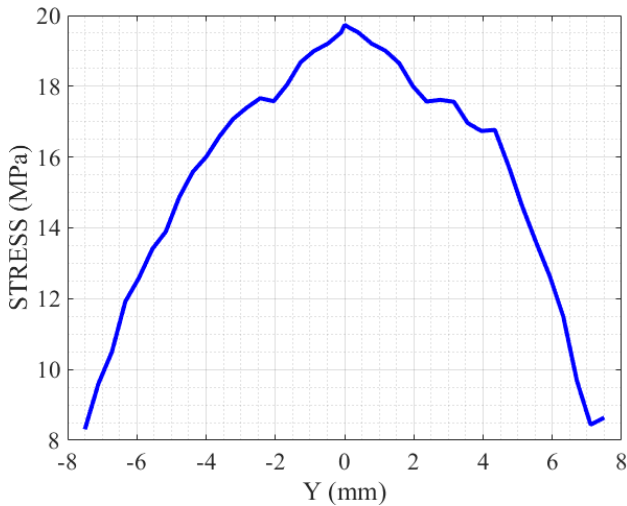


شکل ۵ شبکه بندی سازه یاق و قسمت های حساس و نازک آن

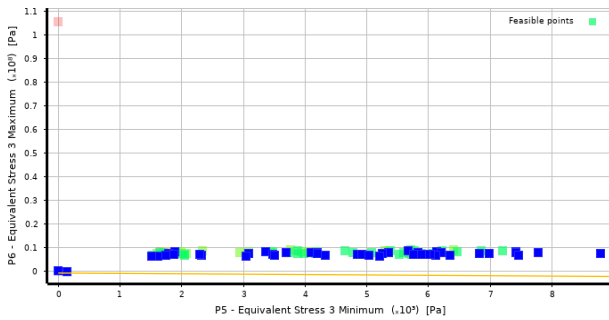
#### ۴- نتایج تحلیل ها و بحث

طبق نتایج تحلیل ها، ماکزیمم نیروی قابل اعمال  $401\text{ N}$  می باشد. تقسیم بندی نیرویی به این طریق است که نیروی پیچ دوم  $60\%$  درصد نیروی اول است و این حالت بهینه است. شکل (۶) کانتور تنش مربوط به حالت بهینه را نشان می دهد. نکات مهم در بررسی ابتدا و انتهای تحلیل به شرح ذیل می باشند:

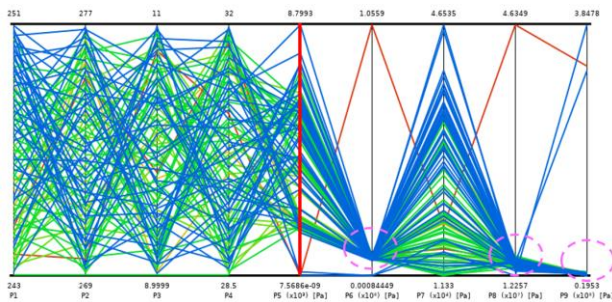
- استراتژی بارگذاری از جایی شروع می شود که سیستم در حالت پایدار باشد. اگر دو نیروی قرار داده شده در حدودی نباشد که از تغییر شکل های سازه جلوگیری کند، سیستم در جهت افقی تغییر شکل زیادی پیدا خواهد کرد. برای مقادیر کمتر از این



شکل ۷ کانتور تنش و تغییرات تنش در قطعه بحرانی در دو راستای Y و X



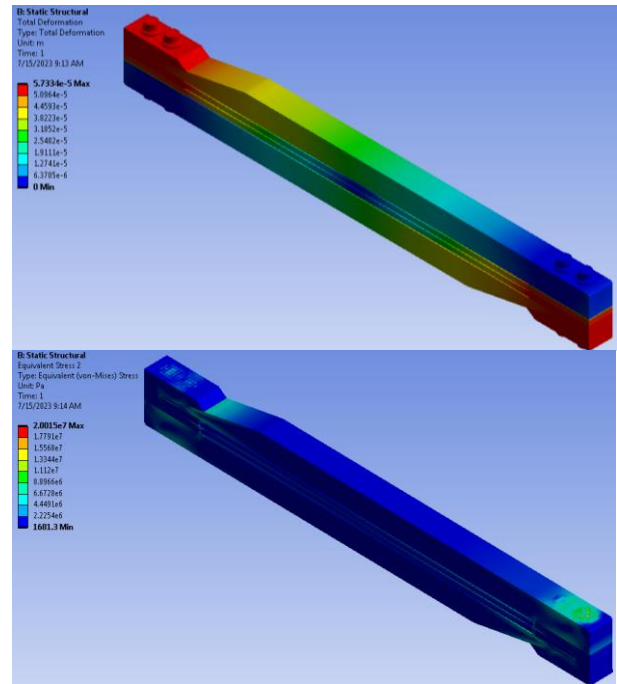
شکل ۸ نمودار مربوط به Tradeoff مدل در بهینه‌سازی یاق



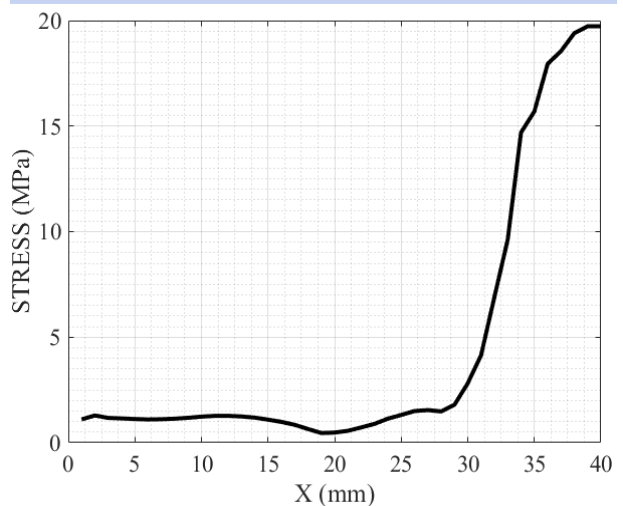
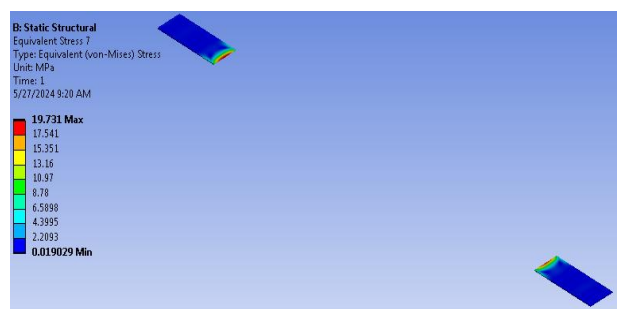
شکل ۹ نمودار مربوط به Sample‌های بهینه‌سازی

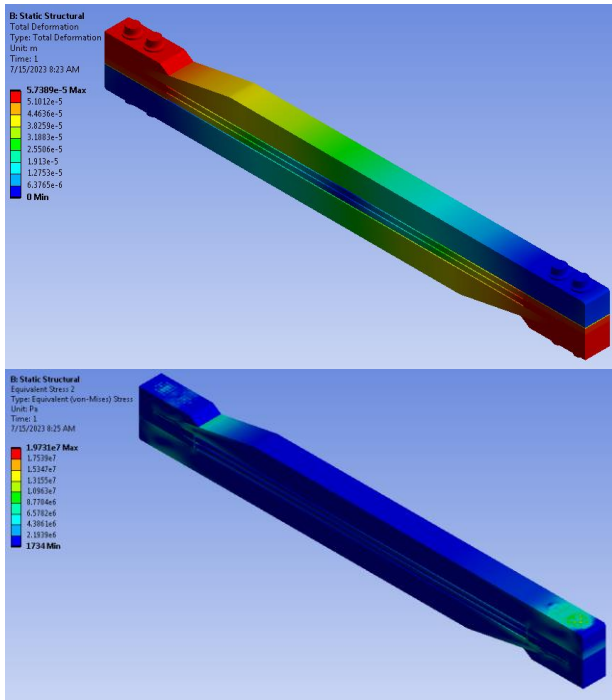
پارامترهای خروجی بهینه‌سازی شامل تنش‌ها بیشینه و کمینه در سمت راست خط‌چین قرمز در شکل (۹) قرار دارند و پارامترهای ورودی بهینه‌سازی شامل پارامترهای هندسی در سمت چپ خط‌چین قرار دارند. مطابق سمت راست خط‌چین، مقادیر تنش‌های بیشینه در هر قسمت لیزر (P6-P8-P9) در بهینه‌سازی به یک محدوده مقادیر خاص همگرا هستند (مناطق خط‌چین صورتی) در صورتی که تنش‌های کمینه (P5-P8) این‌طور نیستند و به مقادیر مختلفی می‌رسند. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که عملکرد بهینه‌سازی در تنش‌های بیشینه بسیار

مطابق شکل (۹)، در فرایند Trade-off بهینه‌سازی، برای مقدار تنش کمینه P5 مقادیر مختلفی بر حسب تنش بیشینه P6 وجود دارد. این مسئله بیانگر پراکندگی جواب‌ها برای تنش کمینه P5 است. البته بازه تغییرات P6 از لحاظ عددی بیشتر از P5 است.

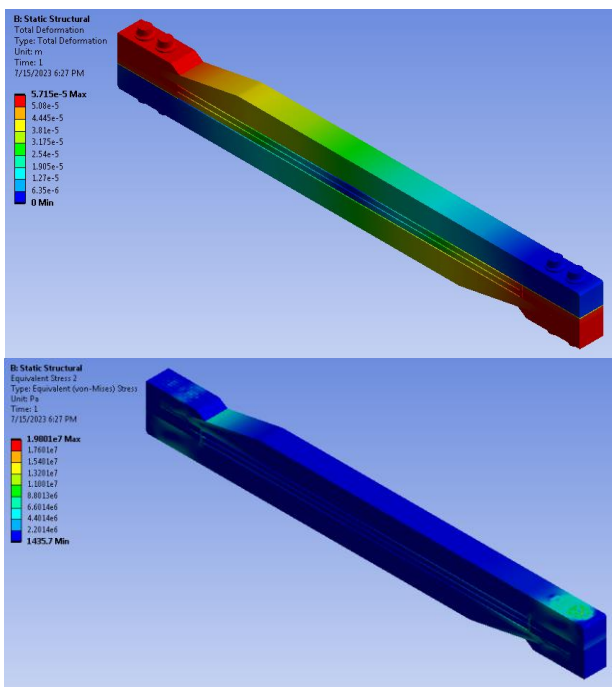


شکل ۶ نتایج تحلیل سازه: تغییر شکل و تنش (از بالا به پایین) برای ماکزیمم حالت بارگذاری ممکن ( $F_1=250$  &  $F_2=151$ )





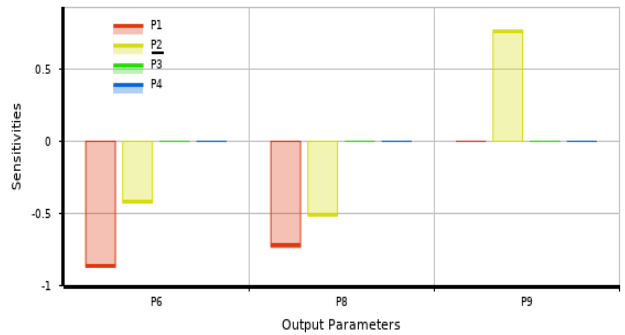
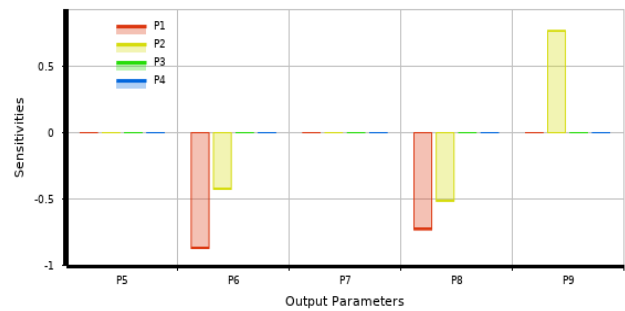
شکل ۱۱ نتایج تحلیل تنش برای حالت بارگذاری ممکن برای لیزر ( $F_1=250$  &  $F_2=140$ )



شکل ۱۲ نتایج تحلیل تنش برای حالت بارگذاری ممکن برای لیزر ( $F_1=155$  &  $F_2=150$ )

این روند تحلیل و بهینه‌سازی برای دیگر انواع یاگ قابل استفاده است. در انواع دیگر فقط پارامترهای ورودی تحلیل و بهینه‌سازی تغییر پیدا می‌کنند اما روش یکسان خواهد بود. در شکل (۱۳) نتایج تحلیل و بهینه‌سازی یک یاگ جدید نشان داده شده است. واضح است که مکان نصب اتصالات تغییر پیدا کرده است و در مکان بهینه مربوط به خود یاگ جدید نصب شده‌اند.

متفاوت از تنش‌های کمینه است. در حالت کلی تغییرات بی‌بعد تنش بیشینه کمتر از تغییرات تنش کمینه می‌باشد. یعنی اگر مقادیر تنش بیشینه و کمینه نرمالیزه شوند (مقادیر هر کدام بر مقدار بیشینه خودشان تقسیم شوند)، تغییرات تنش کمینه بیشتر خواهد بود. اما با توجه به این که مقادیر تنش کمینه بسیار کم می‌باشند، محدوده تغییرات تنش بیشینه، بیشتر از تنش کمینه می‌باشد. این نکته با توجه به این که تنش‌های بیشینه در حدود  $10^6$  و تنش‌های کمینه در حدود  $10^4$  می‌باشد، روشن می‌شود.



- P1 = X2
- P2 = X1
- P3 = D
- P4 = Z
- P5 = Equivalent Stress 3 Minimum
- P6 = Equivalent Stress 3 Maximum
- P7 = Equivalent Stress 4 Minimum
- P8 = Equivalent Stress 4 Maximum
- P9 = Equivalent Stress 2 Maximum

شکل ۱۰ نمودار مربوط به حساسیت پارامترهای بهینه‌سازی مدل

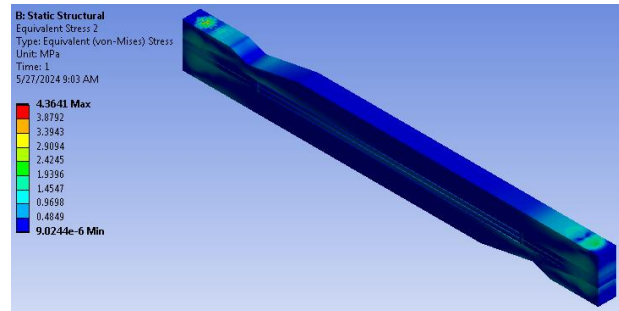
مطابق شکل (۱۰)، تنش‌های بیشینه در هر قسمت از یاگ، حساسیت بیشتری از دو پارامتر هندسی (فاصله بین دو پیچ) دارند و تنش‌های کمینه در هر قسمت از یاگ حساسیت بسیار کمی از این دو پارامتر هندسی دارند. بنابراین در افزایش تنش بیشینه هر قسمت از یاگ، فاصله پیچ‌ها اثر قابل توجهی دارند. بنابراین جهت کاهش تنش‌های بیشینه، می‌توان پارامترهای هندسی مناسبی را اتخاذ نمود. همچنین مطابق این دو شکل، فاصله مربوط به پیچ‌ها، اثرات متفاوتی در بهینه‌سازی دارند. شکل (۱۱) و (۱۲) به ترتیب نشان دهنده نتایج تحلیل سازه‌ای برای حالت بارگذاری ( $F_1=250$  &  $F_2=140$ ) و حالت بارگذاری ( $F_1=250$  &  $F_2=140$ ) هستند.

نیرو شده و در نتیجه در یک نقطه تنش افزایش یافته و در نقاط دیگر کاهش می‌یابد که این به معنی افزایش گرادیان تنش است. طبق نتایج تحلیل پارامتری، نیروی  $F_1$  قابلیت تغییر بیشتری نسبت به نیروی  $F_2$  دارد. این مسئله مربوط به این است که نیروی  $F_1$  بیشتر تأثیر خود را روی یک سطح صاف و نیروی  $F_2$  بیشتر تأثیر خود را سطح مورب می‌گذارد. با افزایش نیروی  $F_2$  امکان لغزش آن روی سطح مورب وجود دارد و باعث ناپایداری می‌شود. این حالت در بارگذاری با استراتژی  $(F_1 = 155 \text{ \& } F_2 = 195)$  دیده می‌شود.

روش مورد استفاده در مطالعه حاضر یک روش نوین در تحلیل و بهینه‌سازی سیستم‌های حساس و شکننده محسوب می‌شود. علاوه بر آن، روش توسعه داده شده قابلیت استفاده در سیستم‌هایی را دارد که نیاز به آب‌بندی داشته و به دلیل شرایط محیطی و فضا، امکان استفاده از آب‌بندهای رایج را دارند. افزایش بارگذاری بدون ایجاد شکست در سیستم یک مسئله مهم در سازه‌های مهندسی محسوب می‌شود تا از خرابی جلوگیری گردد. این روش قابلیت کاهش گرادیان تنش در سیستم‌های پیچیده را دارد. تنش بیشینه در سیستم‌های آب‌بند تابعی از تغییر شکل‌های حرارتی قطعات حساس است.

## ۶- مراجع

- [1] W. Bäumlner, H. Ulrich, A. Hartl, M. Landthaler, and G. Shafirstein. "Optimal parameters for the treatment of leg veins using Nd: YAG lasers at 1064 nm," *British Journal of Dermatology*, vol. 155, no. 2, pp. 364-371, 2006, <https://doi.org/10.1111/j.1365-2133.2006.07314.x>.
- [2] R. F. Barron and B. R. Barron, "Design for Thermal Stresses," John Wiley & Sons, 2011, <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9781118093184>.
- [3] P. Orlov, "Fundamentals Of Machine Design," *Mir Publication*, 1980, <https://mirtitles.org/2018/10/13/fundamentals-of-machine-design-orlov/>.
- [4] M. Shafiei Alavijeh and H. Amirabadi, "Investigation and Optimization Flat Lapping Process Using Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm II," *Amirkabir J. Mech. Eng.*, vol. 52, no. 3, pp. 669-686, 2020, [In Persian], <https://doi.org/10.22060/mej.2018.14421.5853>.
- [5] O. Sunanta, "Flat Surface Lapping: Process Modeling in an Intelligent Environment," Ph. D. dissertation, School of Engineering, University of Pittsburgh, 2002, <http://d-scholarship.pitt.edu/id/eprint/7886>.



شکل ۱۳ نتایج تحلیل تنش برای ماکزیمم حالت بارگذاری ممکن برای یک یاک با ابعاد بزرگ‌تر (طول 345 mm)  $(F_1=200 \text{ \& } F_2=100)$

مطابق شکل (۱۳)، برای یک بارگذاری نزدیک به بارگذاری لیزر قبلی، نتایج تحلیل تنش بسیار متفاوت هستند. این مسئله به این دلیل است که ابعاد بزرگ‌تر باعث کاهش چشم‌گیر تنش شده‌اند. البته نکته مهم این است که قطعات یاک بسیار گران قیمت هستند و الزاماً افزایش اندازه باعث بهبود عملکرد یاک نیستند. با توجه به مقادیر تنش می‌توان گفت در این یاک امکان افزایش بارگذاری و افزایش آب‌بندی وجود دارد.

## ۵- نتیجه‌گیری

بیشینه نیروی مورد اعمال برای آب‌بندی مناسب در یاک،  $N$  با استراتژی بارگذاری  $(F_1 = 250 \text{ N \& } F_2 = 151 \text{ N})$  و کمینه نیروی اعمالی  $300 \text{ N}$   $(F_1 = F_2 = 150 \text{ N})$  می‌باشد. بارگذاری خارج از این محدوده سبب شکست در سیستم و یا عدم بارگذاری مناسب و در نتیجه عدم آب‌بندی سیستم می‌شود. در راستای دستیابی به بهترین حالت ممکن، توزیع نیروی اعمالی به فک باید نیروی پیچ دوم در حدود ۶۰ درصد نیروی پیچ اول باشد. طبق نتایج سازه‌ای تغییر شکل سازه در هنگام بارگذاری بیشینه در حدود ۵۷ میکرومتر خواهد بود. طبق نتایج، بهینه‌سازی نیرویی بسیار اثر بیشتری نسبت به بهینه‌سازی هندسی دارد چرا که بعضی از اندازه‌های هندسی در طول بهینه‌سازی غیرقابل تغییر هستند و با توجه به محدودیت تغییر برخی از اندازه‌ها، تأثیر کلی بهینه‌سازی هندسی کمتر است. طبق نتایج بهینه‌سازی هندسی تأثیر فاصله پیچ‌ها نسبت به یکدیگر بیشتر از پارامترهای هندسی دیگر است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که بیشترین تأثیر در بهینه‌سازی نهایی مربوط به نیروها و موقعیت آن‌ها در هندسه سازه است. مشاهده شده است که با کاهش فاصله دو پیچ هر فک، تنش افزایش قابل توجهی داشته است. مفهوم کاهش فاصله این است که دو نیرو تبدیل به یک

- [13] G. Liu, D. Hou, X. Zhao, D. Yuan, L. Li, and Y. Sun, "Power transformer's electrostatic ring optimization based on ANSYS parametric design language and response surface methodology, " *Applied Sciences*, vol. 9, no. 20, p. 4286, 2019, <https://doi.org/10.3390/app9204286>.
- [14] F. Tan, B. Yang, L. Huang, J. Ding, and Z. Li, "Study on the Structure Optimization of Shield Tunneling Machine's Main Drive Seal, " *Lubr. Eng.*, vol. 47, pp.116-123, 2022, [doi:10.3969/j.issn.0254-0150.2022.04.015](https://doi.org/10.3969/j.issn.0254-0150.2022.04.015).
- [15] Q. Liu, Y. Yin, H. Xu, and Z. Chen, "Finite Element Analysis of Triangular Groove Sealing Performance for Large Cabin on Submersible, " *Lubr. Eng.*, 2021, vol. 46, pp. 163–170, 2021, [doi: 10.3969/j.issn.0254-0150.2021.12.024](https://doi.org/10.3969/j.issn.0254-0150.2021.12.024).
- [16] Y. Ma, Z. Y. Yuan, Y. Ni, X. K. Meng, X. D. Peng, "Performance prediction and multi-objective optimization of metal seals in roller cone bits," *J. Petrol. Sci. Eng.*, 2022, vol. 208, p.109316, 2022.
- [17] X. Liu, S. He, and J. Zheng, "Analysis of Sealing Characteristics of Lip Seal Rings for Deep-Sea Separable Pressure Vessels, " *Applied Sciences*, vol. 13, no. 11, p.6843, 2023, <https://doi.org/10.3390/app13116843>.
- [18] N. Rino Nelson, N Siva Prasad and A.S. Sekhar, "Structural integrity and sealing behaviour of bolted flange joint: A state of art review, " *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 204, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2023.104975>.
- [19] Y. Liu, W. Li and C. Xia, "Research on sealing mechanism and structural improvement of metal sealing structures for high speed drill bits, " *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, vol. 207, 2024, <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2023.105104>.
- [6] M. R. Darmiani and H. Amirabadi, "Lapping of ceramic balls, " *Journal of Mechanical Engineering*, vol. 26, no. 1, pp.48-56, 2016, [In Persian], [https://mmep.isme.ir/article\\_25338.html](https://mmep.isme.ir/article_25338.html).
- [7] I. D. Marinescu, E. Uhlmann, and T. Doi, "Handbook of lapping and polishing, " *Taylor & Francis*, London, 2007, <https://doi.org/10.1201/9781420017632>.
- [8] F. Klocke, and A. Kuchle, "Manufacturing Processes (vol. 2): Grinding, Honing, Lapping, " *Berlin: Springer*, 2009, <https://doi.org/10.1007/978-3-540-92259-9>.
- [9] C. Tong, Y. J. Chao, and J. W. Van Zee, "Sealing force prediction of elastomeric seal material for PEM fuel cell under temperature cycling," *International journal of hydrogen energy*, vol. 39, no. 3, pp.1430-1438, 2014, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.10.086>.
- [10] Y. Zhuang, G. Lian-Xin, and Y. Peng-Bin, "Force analysis and tightening optimization of gas sealing drill pipe joints," *Engineering Failure Analysis*, vol. 58, pp. 173-183, 2015, <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2015.08.032>.
- [11] S. Ramesh, R. Handal, M. J. Jensen, and R. Rusovici, "Topology optimization and finite element analysis of a jet dragster engine mount," *Cogent Engineering*, vol. 7, no. 1, p. 1723821, 2020, <https://doi.org/10.1080/23311916.2020.1723821>.
- [12] R. Gatzi, M. Uebersax, and O. Konig, "Structural optimization tool using genetic algorithms and ansys," in *Proc. 18. CAD-FEM User's Meeting, Internationale FEM-Technologietage, Graf-Zeppelin-Haus, Friedrichshafen, June. 2000*, [https://www.powerpac.ethz.ch/pub-pat/Optimierung\\_mittels\\_Genetischen\\_Algorithmen.pdf](https://www.powerpac.ethz.ch/pub-pat/Optimierung_mittels_Genetischen_Algorithmen.pdf)