



بهینه‌سازی هندسی نمونه تست خستگی فراصوتی بر اساس رفتار ترموالاستیک

محسن آقایی، سعید امینی*

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۰/۱۱/۱۰
بازنگری: ۱۴۰۱/۰۵/۰۱
پذیرش: ۱۴۰۱/۰۷/۲۵
ارائه آنلاین: ۱۴۰۱/۰۲/۲۵

کلمات کلیدی:

خستگی فراصوتی
ترموالاستیک، هندسه
بهینه‌سازی
شبیه‌سازی

خلاصه: امروزه به دلیل پیشرفت تکنولوژی تعداد نوسان‌های اعمالی به برخی قطعات به محدوده 10^7 نوسان و بالاتر می‌رسد اخیراً پژوهشگران به منظور مطالعه رفتار خستگی در این قطعات از تست خستگی فراصوتی استفاده می‌کنند. این دستگاه به دلیل فرکانس بالای بارگذاری و در نتیجه دستیابی به تعداد نوسان بالاتر در زمان کوتاه‌تر مورد توجه هست. استاندارد مورد پذیرش همگانی برای این تست وجود ندارد لذا یکی از هندسه‌هایی که اغلب به منظور نمونه در این تست مورد استفاده قرار می‌گیرد هندسه به فرم ساعت شنی است. در این پژوهش ضمن بررسی این هندسه به منظور دستیابی به هندسه بهینه یا دستیابی به تنش بیشینه، تأثیر پارامترهای هندسی بر افزایش دما در حین ارتعاش در فرکانس بالا یا همان اثر ترموالاستیکی که به‌عنوان یکی از معایب تست خستگی فراصوتی شناخته می‌شود بررسی شده است تا این اثر نیز کمینه گردد. بدین منظور ابعاد هندسه ساعت شنی شکل به صورت پارامتر تعریف گردید و تغییرات آن با استفاده از شبیه‌سازی صورت گرفته مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که با کاهش شعاع انحنا در کنار ثابت بودن قطر میانی و قطر قسمت استوانه‌ای میزان تنش افزایش می‌یابد و همچنین میزان تغییرات دما کاهش می‌یابد از طرفی افزایش قطر قسمت استوانه‌ای در حالی که قطر میانی و میزان انحنا ثابت باشد سبب افزایش میزان تنش و دما می‌گردد. نتایج فوق با استفاده از چیدمان تجربی مورد ارزیابی قرار گرفت و تطابق خوبی در آن‌ها مشاهده گردید.

۱- مقدمه

تولید شده در نمونه هست [۶]. در حین تست خستگی با توجه به فرکانس بالای آن دمای قسمت میانی نمونه افزایش می‌یابد و این افزایش خود می‌تواند منجر اثرات در ماده و خواص خستگی آن گردد و همچنان این موضوع توسط نویسندگان مورد پژوهش می‌باشد [۹-۷]. از جمله اقدامات انجام شده به منظور رفع این مشکل استفاده از خنک‌کننده‌ها و یا استفاده نوسانی از دستگاه (به صورت روشن - خاموش) می‌باشد [۱۴-۱۰]. ولی تاکنون در جستجو انجام شده توسط نویسندگان این مقاله، پژوهشی در زمینه بهینه‌کردن هندسه به منظور کاهش این حرارت تولید شده انجام نشده است. به‌طور کلی سه نمونه هندسه به منظور ایجاد نمونه در دستگاه تست خستگی در حالت کششی فشاری مورد توجه محققان بوده است. نمونه شبه استخوانی^۱، نمونه ساعت شنی شکل^۲ و نمونه گوسین^۳. هندسه شماتیک این سه نمونه در شکل ۱ مشاهده می‌گردد.

امروزه با توجه به پیشرفت‌های حاصل شده در زمینه‌های مهندسی و تکنولوژی، استفاده از تجهیزات با طول عمر بیشتر مورد نیاز و توجه می‌باشد. در این مورد می‌توان به صنایع هوایی اشاره کرد [۱]. این عمر در بعضی موارد به بیش از 10^7 سیکل می‌رسد. تست خستگی با استفاده از دستگاه فراصوتی در ناحیه خستگی خیلی زیاد با توجه به فرکانس کاری آن (در حدود ۲۰ کیلو هرتز) اجازه دستیابی به تعداد سیکل بالاتر در مدت زمان کمتر را فراهم کرده است و از این رو به تازگی مورد توجه بسیاری از محققین حوزه خستگی واقع شده است. تاکنون هیچگونه استاندارد مورد پذیرش به منظور روند انجام و هندسه مشخص برای این تست به دست نیامده است [۲] از این رو بسیاری از محققین یا از نمونه‌های تجاری شده این دستگاه استفاده نموده‌اند [۱ و ۳] و یا خود دستگاهی را توسعه داده‌اند [۴ و ۵].

دستگاه تست خستگی به روش فراصوتی در کنار مزایای خود دارای معایب نیز هست. یکی از مشکلات موجود در دستگاه تست خستگی حرارت

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: amini.s@kashanu.ac.ir





شکل ۱. هندسه شماتیک سه نمونه استفاده شده در مطالعات تست خستگی

Fig. 1. Schematic geometry of three type of specimens used in fatigue test

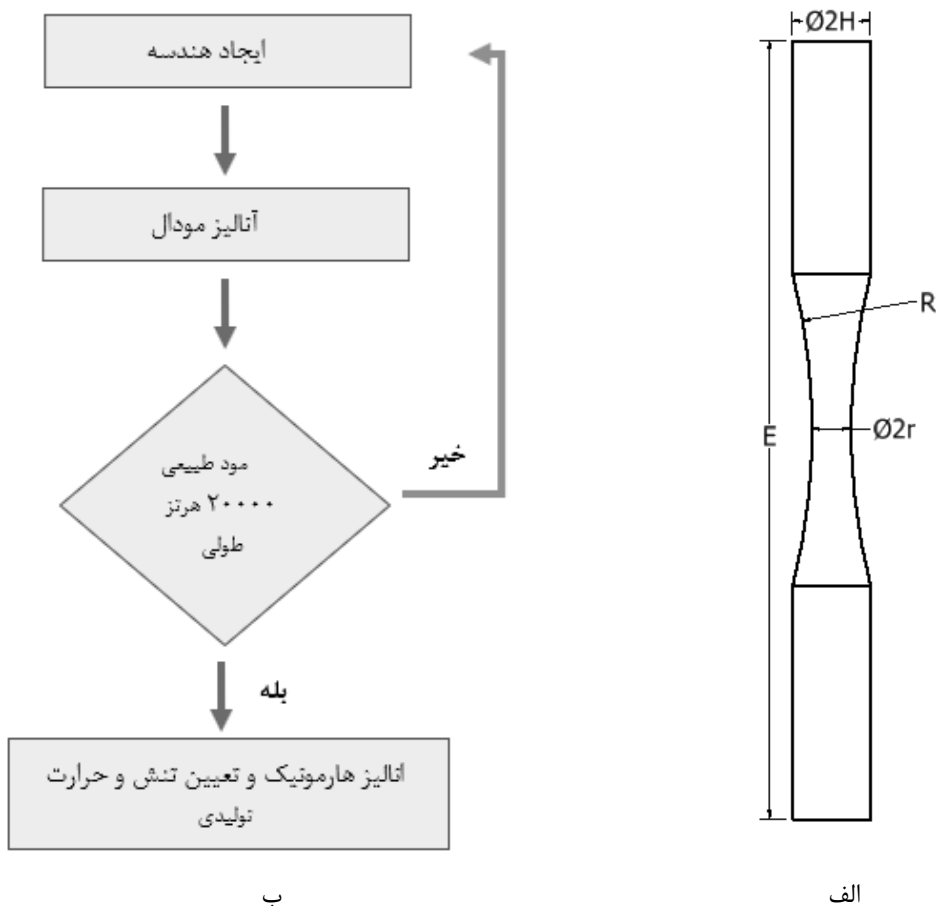
۲- الگوسازی نظری

به منظور ایجاد نمونه مورد نظر برای تست خستگی فراصوتی دو شرط هم فرکانس بودن و دارای مود فرکانسی مشابه با بقیه مجموعه نظیر: هورن، بوستر و ترانسدیوسر از شروط اصلی برای هندسه نمونه است. هندسه نمونه دارای تقارن بوده و گره ارتعاشی (بیشینه تنش) در وسط نمونه و شکم ارتعاشی در دو انتهای نمونه اتفاق می افتد. تلاش طراح این است که قطر ابتدایی استوانه کوچک تر نباشد تا از اتلاف موج انتقالی از هورن به نمونه پرهیز کند و معمولاً مشاهده شده پژوهشگران قطر میانی نمونه را از ۳ تا ۵ میلی متر انتخاب می کنند. البته اگر هدف از پژوهش بررسی اثر اندازه نمونه و یا بررسی نقش عیوب در شکست خستگی باشد این اندازه می تواند بیشتر باشد.

با شرایط بیان شده در بالا و دامنه پارامترهای ذکر شده می توان دریافت که هندسه واحدی برای تست در یک جنس خاص وجود ندارد و با تغییر ابعاد نمونه از حیث طول، قطر و میزان انحنا می توان نمونه های گوناگونی که شرایط بالا را داشته باشد برای یک جنس مشخص طراحی نمود. در شکل ۲ هندسه ای از نمونه ساعت شنی شکل و پارامترهای هندسی آن نشان داده شده است بدین ترتیب مطابق با فلو چارت ارائه شده در شکل روند طراحی برای دستیابی به میزان تنش و حرارت تولیدی در نمونه انجام می گیرد.

نمونه های شبه استخوانی بیشتر در حالت های سنتی یا به عبارتی تست خستگی با فرکانس پایین مورد استفاده بوده است [۱۵ و ۱۶] و این در حالیست که در اکثر مطالعات انجام شده در زمینه تست خستگی در حوزه چرخه خیلی زیاد، دو نمونه ساعت شنی شکل و گوسپین مورد استفاده بوده است. در واقع اغلب کارهای صورت گرفته هندسه نمونه به فرم ساعت شنی شکل بوده هر چند که طی چند سال اخیر به منظور بررسی نقش اندازه نمونه و ناحیه حجم احتمالی شکست (حجمی از ماده که مورد اعمال تنشی بیش از ۹۰ درصد تنش بیشینه در قطعه می باشد) در عمر خستگی، هندسه ای جدید مورد توجه قرار گرفت و بدین صورت این نمونه جدید با نام گوسپین برای تست هندسه هایی با حجم احتمالی شکست^۱ بالا مورد استفاده قرار گرفت. این تغییر به منظور بررسی بیشتر نقش عیوب ایجاد گردید [۱۷ و ۱۸]. اما از دیدگاه دیگر همچنان نمونه های ساعت شنی شکل مورد بررسی کامل تری از حیث ابعادی قرار نگرفته اند.

در این پژوهش به بررسی هندسه نمونه تست خستگی با توجه به نقش پارامترهای هندسی آن در تأمین تنش مورد نظر و از سوی دیگر بررسی رفتار دمایی نمونه از دید رفتار ترموالاستیک پرداخته می شود تا بتوان نمونه ای در حالت بهینه از حیث تنش و حرارت را انتخاب نمود.



شکل ۲. الف- پارامترهای در نظر گرفته در هندسه ساعت شنی شکل. ب- فلوچارت بررسی و انتخاب تنش و حرارت تولیدی در نمونه

Fig. 2. A- parameters considered in hourglass shape geometry. B - Flowchart of checking and selecting of stress and heat that produced in the sample

جدول ۱: مقادیر دو پارامتر H و r

Table 1. The values of H and r

مقادیر (mm)	متغیر
۶، ۵/۵، ۵، ۴/۵، ۴	H
۲/۵، ۱/۵	r

هندسه‌های به دست آمده از لحاظ شرایط ساخت حدود ۲۰۰ هندسه که فرکانس در حدود ۲۰۰۰۰ هرتز دارند مورد بدست آمد. این هندسه‌ها تمامی حالات مختلف نیستند و از لحاظ ساخت نیز مورد بررسی قرار گرفته‌اند. همچنین تنش و حرارت تولید شده ناشی از اتلاف انرژی صورت گرفته در حین ارتعاش ۱۰ میکرونی، به کمک تحلیل نرم‌افزاری بدست آمد و بررسی‌ها به منظور دستیابی به هندسه بهینه صورت گرفت.

هندسه مورد نظر، با لحاظ کردن این شرط که می‌بایست ارتعاشی با مود طولی و در فرکانس تقریبی ۲۰۰۰۰ هرتز داشته باشد تعیین می‌گردد. با توجه به ملاحظات تولید نظیر دقت دستگاه و هزینه تولید، بازه‌های مورد نظر برای پارامترهای H و r به نحو زیر تعیین گردید و دو پارامتر دیگر با در نظر گرفتن شرایط بیان شده تعیین می‌گردند. به این ترتیب با جایگشت پارامترهای بیان شده در شکل، و بررسی

جدول ۲. خواص مورد استفاده در شبیه سازی صورت گرفته [۱۹]

Table 2. properties used in the simulation [19]

مدول یانگ [GPa]	چگالی [kg / m ^۳]	ضریب پواسیون
۷۴/۵	۲۷۴۰	۰/۳۳

۳- شبیه سازی

به منظور شبیه سازی، مطالعه موردی بر روی آلومینیوم ۷۰۷۵ انجام شد. خواص مورد استفاده در شبیه سازی صورت گرفته در جدول ۲ موجود است. به منظور شبیه سازی از نرم افزار کامسول استفاده گردیده است. در تست خستگی اولتراسونیک، همانطور که قبلاً بیان گردید به منظور ارتعاش همه اجزا باید در مود طولی یکسان و دارای محدوده فرکانس یکسانی باشند. برای این منظور در این پژوهش مطابق با آنچه در فلوجارت نشان داده شده ابتدا با تغییر پارامترها و آنالیز مودال هندسه هایی که دارای مود طولی در محدوده ۲۰۰۰۰ هرتز است، طراحی می شود. سپس در دوشاخه میزان تنش و حرارت اتلافی ناشی از ارتعاشات در این فرکانس به ازای ۱۰ میکرون ارتعاش بدست می آید.

۳-۱- شبیه سازی تنش و حرارت

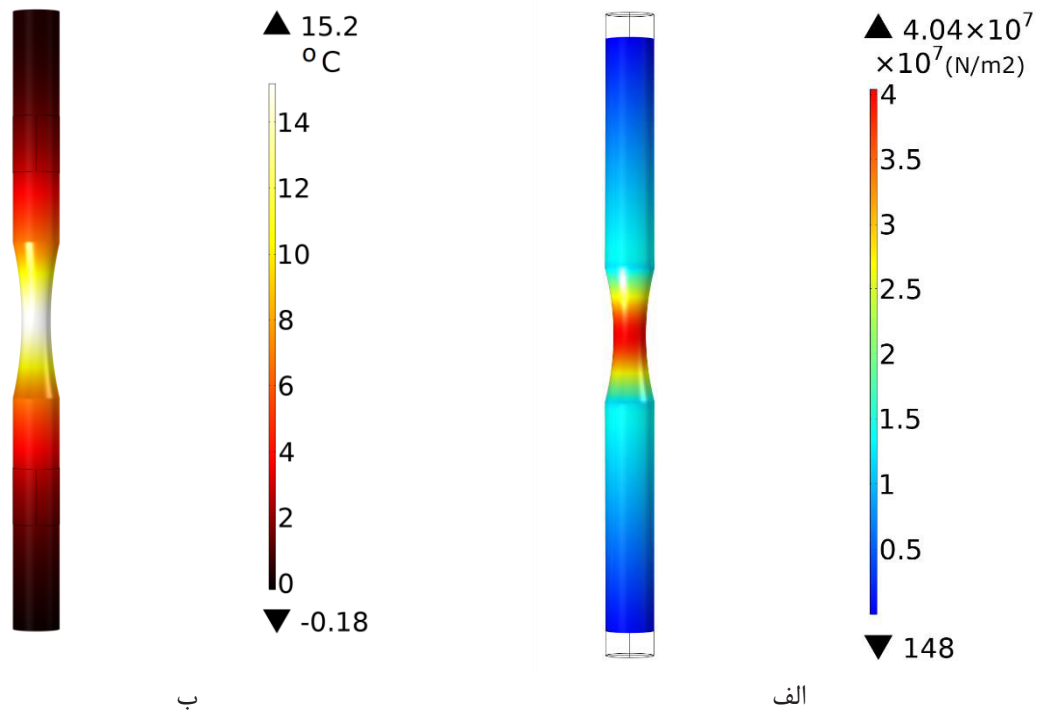
به منظور دستیابی به تنش و افزایش دمای انرژی اتلاف کننده ناشی از اثر ترموالاستیک در نمونه خستگی، تحلیلی هارمونیک، در قالب کوپل محیط انتقال حرارت و محیط جامدات در نرم افزار کامسول انجام گردید [۱۹]. در این شبیه سازی رفتار ماده بصورت الاستیک همراه به ضریب دمپینگ آن تعریف شده و به یک سمت نمونه جابجایی ۱۰ میکرونی اعمال شده است. دمای اولیه قطعه تعریف و منبع حرارتی ناشی از اتلاف تعریف گردیده است. همانطور که در شکل ۳ مشاهده می شود، برای یک هندسه مشخص از میان هندسه های بررسی شده، میزان تنش و افزایش دما در حالی که ارتعاش هارمونیک ۱۰ میکرونی به نمونه وارد می شود، مشخص شده است.

۴- نتایج و بحث

شکل ۴ تغییرات تنش و دما را در میزان ثابت H و r نشان می دهد. میزان H برابر با ۴ میلیمتر و میزان r برابر است با ۲/۵ میلیمتر می باشد. بازه تغییرات R و E به گونه ای است که شرط آنالیز مودال تأیید گردد. همانطور که در شکل مشخص است در H و r ثابت با افزایش R تنش کاهش می یابد ولی دما به صورت سهمی گون در ابتدا به صورت افزایشی و سپس کاهش می شود در واقع به نظر می رسد با توجه به این نمودار می توان بدین گونه استنباط کرد که در میزان ثابت قطر در قسمت انتهایی و میانی هر چه شعاع انحنا کوچکتر باشد تنش بیشتری را می توان شاهد بود. همچنین با کاهش R در همه مقادیر E ، یا شیب افزایش دما کاهش می یابد (در مقادیر ابتدایی E) و یا دما خود کاهش می یابد (در مقادیر بالاتر E) و به طور کلی می توان گفت هر چه شعاع انحنا کوچکتر باشد اثرات افزایش دما ناشی از ارتعاشات نیز کمینه خواهد بود.

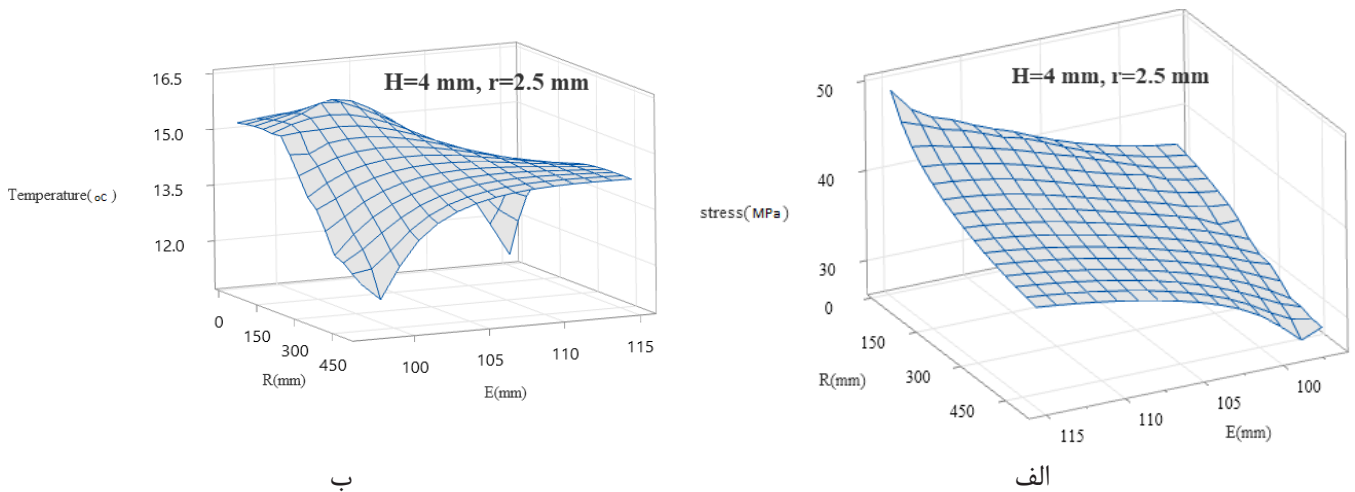
همچنین با توجه به این شکل در می یابیم در مورد متغیر E با افزایش آن در R ثابت تنش افزایش می یابد و دما تقریباً به صورت سهموی متغیر است ولی به طور کلی با کاهش E در همه مقادیر R اثرات افزایش دما کاهش خواهد بود در مقادیر بالاتر R دما کاهش می یابد و در مقادیر پایین R شیب نمودار کاهش می یابد.

از طرفی با توجه به نمودار موجود در شکل ۵ می توان به روشنی روند کاهش تنش به ازای افزایش R در H و r ثابت را همان طور که در قسمت قبل بیان گردید مشاهده کرد از طرف دیگر مشاهده می گردد که افزایش قطر قسمت استوانه ای (H) در حالی که قطر میانی ثابت باشد خود سبب افزایش تنش می گردد.



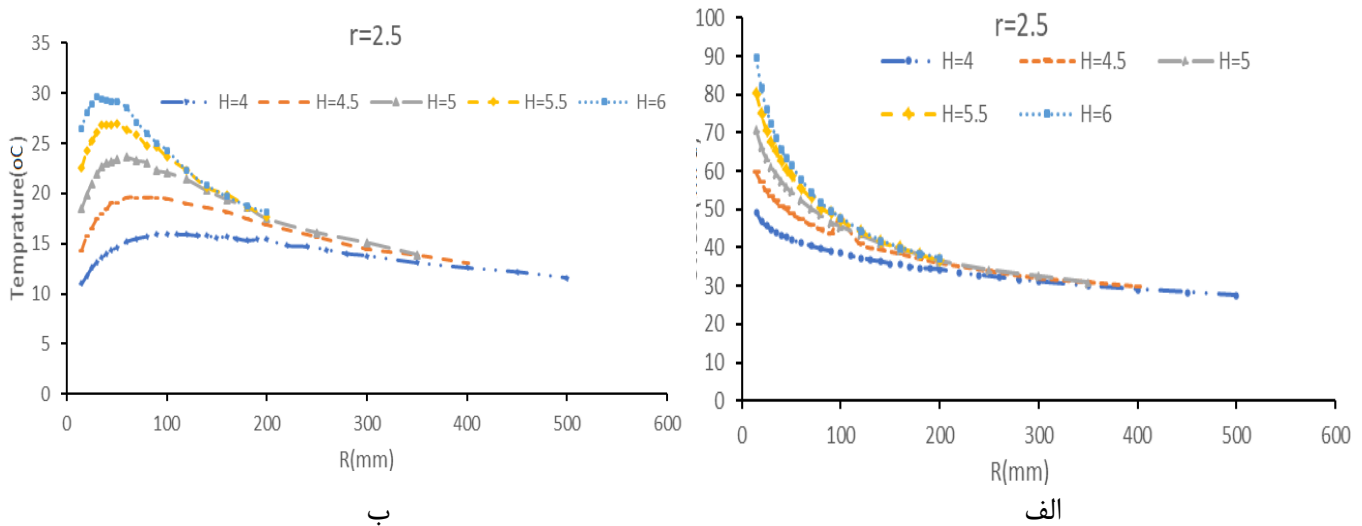
شکل ۳. الف- میزان تنش بر حسب نیوتن بر متر مربع، بدست آمده در یک نمونه به ازای ۱۰ میکرون ارتعاش، ب- میزان حرارت تولیدی در همان نمونه بر حسب سانتیگراد، به ازای ۱۰ میکرون ارتعاش

Fig. 3. A- The amount of stress (N/m²), obtained in a sample per 10 microns of vibration, B- The amount of heat produced in the same sample (°C), per 10 microns of vibration



شکل ۴. بررسی تغییرات تنش و دما در H و r ثابت نسبت به R و E

Fig. 4. Changes in stress and temperature at constant H and r compared to R and E



شکل ۵. بررسی تغییرات تنش و دما در r ثابت به ازای مقادیر مختلف H نسبت به R

Fig. 5. Investigating changes in stress and temperature at constant r for different values of H compared to R

زیر برقرار است:

$$k = \frac{\omega}{c} \quad (1)$$

$$\alpha = \frac{1}{L_2} \arccos h\left(\frac{R_2}{R_1}\right) \quad (2)$$

$$\beta = \sqrt{\alpha^2 - k^2} \quad (3)$$

$$\varphi(L_1, L_2) = \frac{\cos(L_1 k) \cosh(\alpha L_2)}{\sinh(\beta L_2)} \quad (4)$$

$$A_0 \varphi(L_1, L_2) \frac{[\beta \cosh(\beta x) \cosh(\alpha x) - \alpha \sinh(\beta x) \sinh(\alpha x)]}{\cosh^2(\alpha x)} \quad (5)$$

که در آن c سرعت صوت در جسم و E_d مدول یانگ دینامیک و A دامنه ارتعاش انتهایی آن می‌باشد.

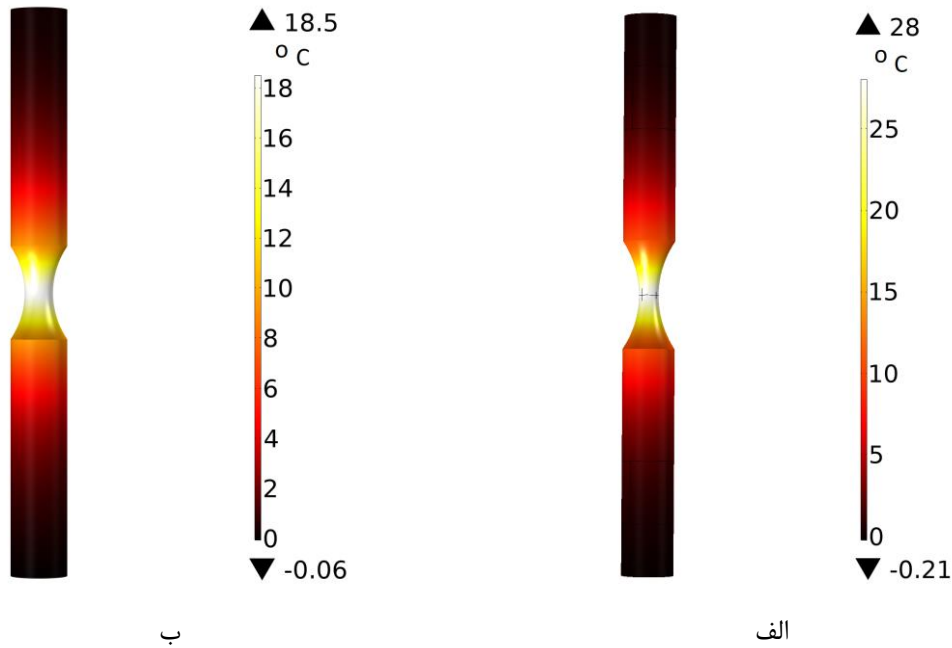
در شکل ۵ قسمت ب نیز مشاهده می‌شود که روند تغییرات R نسبت دما به صورت سهموی هست و مقادیر کمینه دما در R پایین بدست می‌آید. همچنین با افزایش مقادیر H افزایش دما را به ازای افزایش مقادیر R را شاهد خواهیم بود.

به طور کلی می‌توان از نمودارهای بالا نتیجه گرفت که برای دستیابی به شرایط بهینه (ماکزیمم تنش دریافتی و مینیمم افزایش دما) پارامتر R می‌بایست کمینه باشد

پس از بررسی حدود ۲۰۰ مورد حاصل از جایگشت پارامترها دو حالت بهینه با توجه به میزان تنش و حرارت برای دو قطر میانی ۳ و ۵ میلیمتری بدست آمد. این نتایج در شکل ۶ مشاهده می‌گردد. همچنین این مقادیر در جدول ۳ مشاهده می‌گردد.

۴-۱- اعتبارسنجی و تست تجربی

به منظور ایجاد شرایط آزمایشگاهی برای انجام این تست از دستگاه توسعه یافته در دانشگاه کاشان [۲۰]، استفاده گردید بدین ترتیب ابتدا دو نمونه بهینه بدست آمده از نتایج شبیه سازی ساخته شد که تصویر آن در شکل ۷ مشاهده می‌گردد و سپس با استفاده از اتصال ترموکوپل شرایط دمایی و میزان افزایش دما در حین اعمال ۱۰ میکرون ارتعاش بدست آمد. همچنین به منظور بررسی میزان تنش از رابطه موجود در مرجع [۲۰] استفاده گردید. بدین صورت که برای یک نمونه با هندسه شکل ۸ رابطه‌های



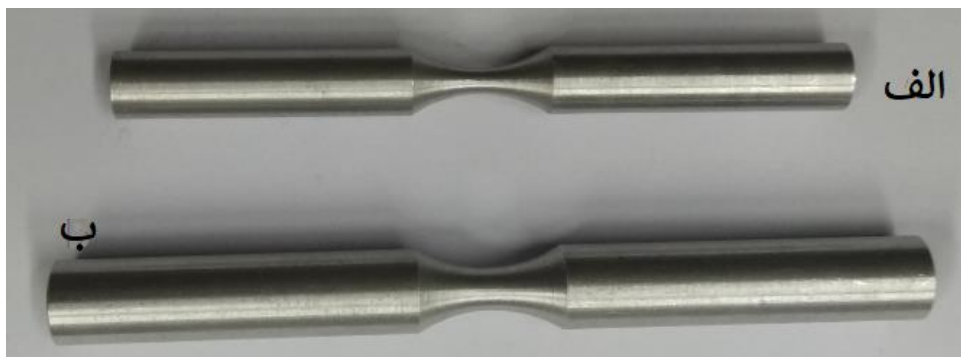
شکل ۶. میزان حرارت تولید شده در نمونه‌های بهینه شده الف- نمونه با قطر میانی ۳ میلیمتر، ب- نمونه با قطر میانی ۵ میلیمتر

Fig. 6. The amount of heat produced in the optimized samples a- sample with a middle diameter of 3 mm, b- sample with a middle diameter of 5 mm

جدول ۳. مقادیر تنش و حرارت تولیدی در دو نمونه بهینه و مقادیر پارامترهای هندسی آن

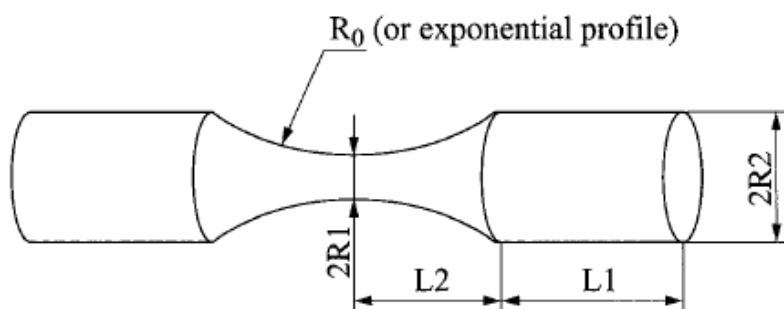
Table 3. Values of stress and heat production in two optimal samples and its geometrical parameters

$E(\text{mm})$	$R(\text{mm})$	$r(\text{mm})$	$H(\text{mm})$	دما(°C)	تنش(MPa)
۸۶	۱۵	۱/۵	۴	۲۸/۱	۱۰۵/۰۳
۱۰۱	۱۵	۲/۵	۵	۱۸/۵	۷۰/۸



شکل ۷. نمونه‌های ساخته شده با توجه به نتایج شبیه سازی، الف- نمونه با قطر میانی ۳ میلیمتر، ب- نمونه با قطر میانی ۵ میلیمتر

Fig. 7. The samples made according to the simulation results, a- sample with a middle diameter of 3 mm, b- sample with a middle diameter of 5 mm



شکل ۸. هندسه یک نمونه ساعت شنی شکل [۲۰]

Fig. 4. The geometry of an hourglass-shaped sample [20]

جدول ۴. مقایسه تنش بدست آمده از رابطه تئوری و شبیه سازی

Table 4. Comparison of stress obtained from theory and simulation

نمونه با قطر میانی ۳ میلیمتر	نمونه با قطر میانی ۵ میلیمتر	
۱۰۵/۰۳	۷۰/۸	تنش بدست آمده از رابطه تئوری (مگا پاسکال)
۱۰۴/۷۷	۶۷/۸	تنش بدست آمده از شبیه سازی (مگا پاسکال)

رفتار ترمو الاستیک نمونه تست خستگی التراسونیک شبیه سازی گردید.

- با کاهش شعاع انحنا (R) در کنار ثابت بودن قطر میانی (r) و قطر قسمت استوانه‌ای (H) میزان تنش افزایش می‌یابد و همچنین میزان تغییرات دما کاهش می‌یابد.

- با افزایش طول قطعه (E) در R ثابت تنش افزایش می‌یابد و به طور کلی با کاهش E در همه مقادیر R اثرات افزایش دما کاهشی خواهد بود.

- افزایش قطر قسمت استوانه‌ای در حالی که قطر میانی و میزان انحنا ثابت باشد سبب افزایش میزان تنش و دما می‌گردد.

. - نتایج تجربی تطابق خوبی با شبیه سازی صورت گرفته دارد.

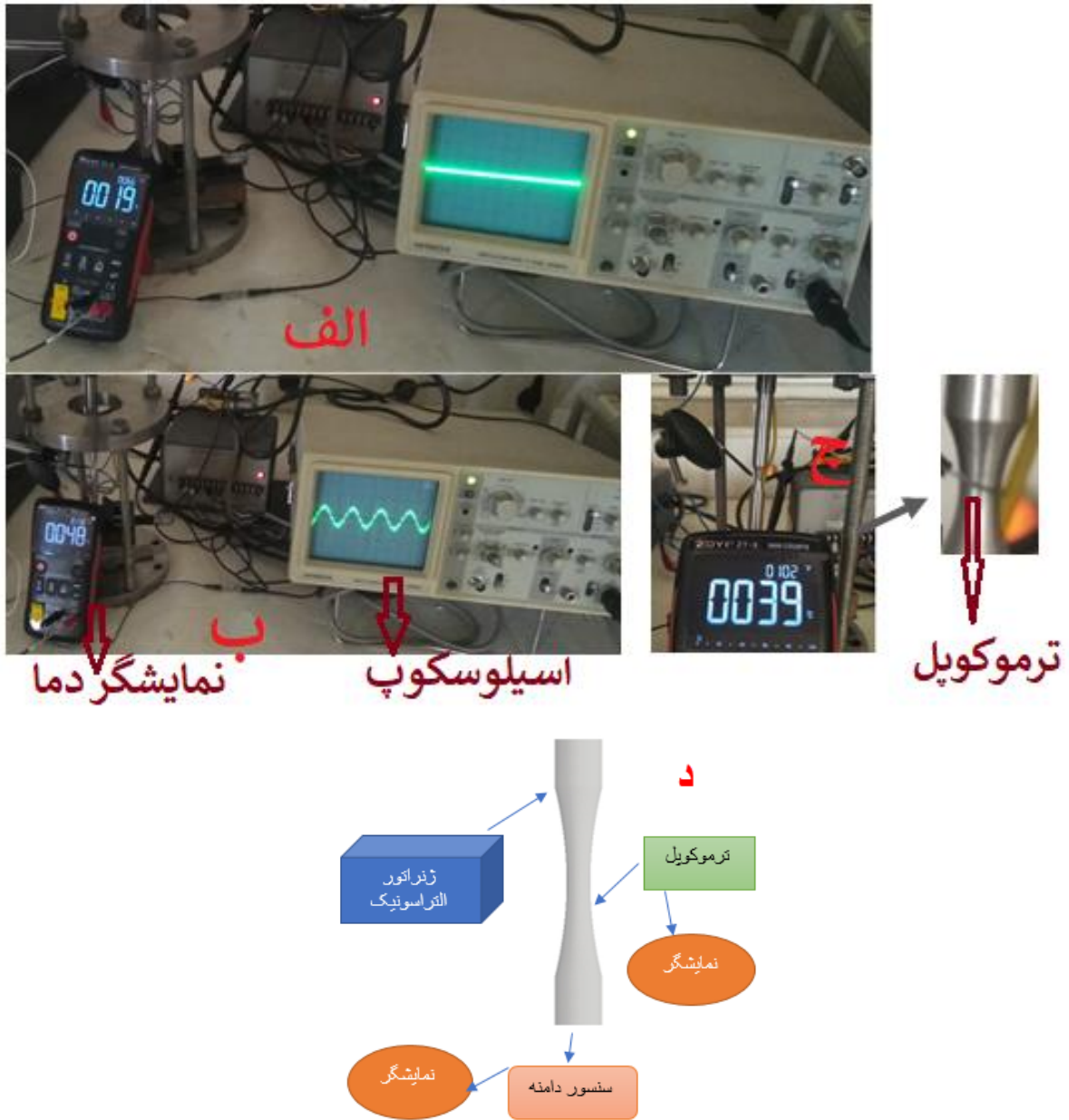
از یافته‌های این مقاله می‌توان در طراحی هندسه نمونه تست خستگی فراصوتی استفاده کرد. به نحوی که به منظور کاهش اثر مخرب افزایش دما در مرحله طراحی هندسه نمونه به گونه‌ای طراحی گردد که ضمن داشتن شرایط تست در قالب دستگاه تست خستگی فراصوتی، دستیابی به تنش بیشینه در کنار کاهش میزان افزایش دما را نیز داشته باشد.

دمای اولیه برای نمونه‌ها همانطور که در شکل ۹ مشخص است برابر با ۱۹ درجه سانتی گراد هست و پس از اعمال ارتعاش و رسیدن به دمای پایدار میزان افزایش به ترتیب برابر با ۲۰ درجه و ۲۹ درجه سانتی گراد می‌باشد که تطابق خوبی با نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی دارد.

در جدول ۴ مقایسه‌ای در مورد تنش بدست آمده از رابطه تئوری مرجع [۲۰] و شبیه سازی صورت گرفته نشان داده شده است که این نتایج نیز نشان دهنده اعتبار شبیه‌سازی انجام شده می‌باشد.

۵- نتیجه گیری

یکی از معایب تست خستگی فراصوتی افزایش دمای ناشی از ارتعاشات در فرکانس فراصوتی می‌باشد که در این پژوهش ارتباط پارامترهای هندسی نمونه در کمینه کردن آن مورد بررسی قرار گرفت. در این مقاله به بررسی هندسه نمونه تست خستگی با توجه به نقش پارامترهای هندسی آن در تأمین تنش مورد نظر و از سوی دیگر بررسی رفتار دمای نمونه از دید رفتار ترمو الاستیک پرداخته شد تا بتوان نمونه‌ای در حالت بهینه از حیث تنش و حرارت را انتخاب نمود. در این پژوهش نتایج زیر بدست آمد:



شکل ۹. الف- چیدمان تست تجربی به منظور راستی آزمایی شبیه سازی صورت گرفته است (دمای مشاهده شده دمای قبل از ایجاد نوسان هست). ب - دمای پایدار نمونه کوچک تر (قطر میانی ۳ میلیمتری) ج - دمای پایدار نمونه بزرگ تر (قطر میانی ۵ میلیمتر) - نمای بزرگتر و نحوه اتصال المنت ترموکوپل به نمونه-د- شماتیک مدار چیدمان تست

Fig. 9. A- The arrangement of the experimental test has been done in order to verify the simulation (the observed temperature is the temperature before the oscillation). B- The stable temperature of the smaller sample (middle diameter 3 mm) C - The stable temperature of the larger sample (middle diameter 5 mm)-Larger view and connection method of Thermocouple to sample-D- schematic circuit of the test setup

- Welded Joints in Aluminum Alloys, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 611 (2019) 012011.
- [10] A. Abboud, A. AlHassan, B. Dönges, J.S. Micha, R. Hartmann, L. Strüder, H.-J. Christ, U. Pietsch, VHCF damage in duplex stainless steel revealed by microbeam energy-dispersive X-ray Laue diffraction, *International Journal of Fatigue*, 151 (2021).
- [11] W. Cui, X. Chen, C. Chen, L. Cheng, J. Ding, H. Zhang, Very High Cycle Fatigue (VHCF) Characteristics of Carbon Fiber Reinforced Plastics (CFRP) under Ultrasonic Loading, *Materials (Basel)*, 13(4) (2020).
- [12] A. Illgen, M. Baaske, F. Ballani, A. Weidner, H. Biermann, Influence of ceramic particles and fibre reinforcement in metal-matrix-composites on the VHCF behaviour. Part I: Experimental investigations of fatigue and damage behaviour, in: *Fatigue of Materials at Very High Numbers of Loading Cycles*, (2018) 295-318.
- [13] A. Tridello, VHCF Response of Two AISI H13 Steels: Effect of Manufacturing Process and Size-Effect, *Metals*, 9(2) (2019).
- [14] M. Zhao, T. Wu, Z. Zhao, L. Liu, G. Luo, W. Chen, Ultrasonic Fatigue Device and Behavior of High-Temperature Superalloy Inconel 718 with Self-Heating Phenomenon, *Applied Sciences*, 10(23) (2020).
- [15] J. Soyama, O.M. Ferri, T. Ebel, K.U. Kainer, Axial fatigue testing of Ti-6Al-4V using an alternative specimen geometry fabricated by metal injection moulding, *Powder Metallurgy*, 59(5) (2016) 344-349.
- [16] H. Zhang, D. Wang, C. Deng, Optimal Preparation Process for Fatigue Specimens Treated by Ultrasonic Peening, *Experimental Techniques*, 42(2) (2017) 199-207.
- [17] A. Tridello, D.S. Paolino, G. Chiandussi, M. Rossetto, Analytical Design of Gigacycle Fatigue Specimens for Size Effect Evaluation, *Key Engineering Materials*, 577-578 (2013) 369-372.
- [18] A. Tridello, D.S. Paolino, M. Rossetto, Ultrasonic [1] Y. Furuya, K. Kobayashi, M. Hayakawa, M. Sakamoto, Y. Koizumi, H. Harada, High-temperature ultrasonic fatigue testing of single-crystal superalloys, *Materials Letters*, 69 (2012) 1-3.
- [2] M. Fitzka, B.M. Schonbauer, R.K. Rhein, N. Sanaei, S. Zekriardhani, S.A. Tekalur, J.W. Carroll, H. Mayer, Usability of Ultrasonic Frequency Testing for Rapid Generation of High and Very High Cycle Fatigue Data, *Materials (Basel)*, 14(9) (2021).
- [3] H. Ghadimi, A.P. Jirandehi, S. Nemati, S. Guo, Small-sized specimen design with the provision for high-frequency bending-fatigue testing, *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 44(12) (2021) 3517-3537.
- [4] S. Heinz, F. Balle, G. Wagner, D. Eifler, Analysis of fatigue properties and failure mechanisms of Ti6Al4V in the very high cycle fatigue regime using ultrasonic technology and 3D laser scanning vibrometry, *Ultrasonics*, 53(8) (2013) 1433-1440.
- [5] I.F. Zuñiga Tello, M. Milković, G.M. Domínguez Almaraz, N. Gubelj, Ultrasonic and Conventional Fatigue Endurance of Aeronautical Aluminum Alloy 7075-T6, with Artificial and Induced Pre-Corrosion, *Metals*, 10(8) (2020).
- [6] W. Peng, Y. Zhang, B. Qiu, H. Xue, A Brief Review of the Application and Problems in Ultrasonic Fatigue Testing, *AASRI Procedia*, 2 (2012) 127-133.
- [7] C. Bathias, Coupling effect of plasticity, thermal dissipation and metallurgical stability in ultrasonic fatigue, *International Journal of Fatigue*, 60 (2014) 18-22.
- [8] Z.y. Huang, Q. Wang, D. Wagner, C. Bathias, A very high cycle fatigue thermal dissipation investigation for titanium alloy TC4, *Materials Science and Engineering: A*, 600 (2014) 153-158.
- [9] R. Zhang, X. Li, Y. Liu, C. He, Effect of Ultrasonic Peening Treatment on VHCF Behavior of Friction Stir

2021, pp. 1-3.

[20] S. Amini, M. Aghaei, Study the Fatigue Behavior of AISI 1045 Steel Using Ultrasonic Fatigue Test Machine, Amirkabir Journal of Mechanical Engineering, 51(5) (2019) 1017-1024.

VHCF Tests on Very Large Specimens with Risk-Volume Up to 5000 mm³, Applied Sciences, 10(7) (2020).

[19] M. Aghaei, S. Amini, Thermo-elastic heating in VHCF specimen, in: Eighth International Conference on Very High Cycle Fatigue (VHCF8), Online & On-demand

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M. Aghaei, S. Amini, Geometric Optimization of Ultrasonic Fatigue Test Specimens Based on Thermo-Elastic Behavior, Amirkabir J. Mech Eng., 54(10) (2023) 2399-2410.

DOI: 10.22060/mej.2022.21050.7366



