

# تخمین عمر غلتک‌های نورد حلقه جهت شکل دهی اسپول موتور به روش مانسون-هالفورد-هایباخ

علی نگهبان<sup>\*</sup>، مصطفی لیوانی<sup>۱</sup>، محسن دهقانی<sup>۱</sup>، محمد نیکویی<sup>۲</sup>

۱- استادیار مهندسی هوافضا، دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری، تهران

۲- کارشناس ارشد مکانیک، دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری، تهران

(دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۱۲/۱۰ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۰/۱۰)

## چکیده

نورد حلقه جهت تولید حلقه‌های بدون درز کاربرد دارد. این حلقه‌ها دارای خواص منحصر به فرد از جمله جریان مناسب دانه‌بندی و مقاومت در برابر رشد ترک می‌باشند. اسپول موتور هواپیما معمولاً به این روش تولید می‌شود. خرابی غلتک‌ها در هنگام ساخت حلقه، ممکن است منجر به خراب شدن ریزساختار و هندسه اسپول موتور و بروز حوادث جبران ناپذیر گردد، لذا ارزیابی غلتک‌های دستگاه نورد حلقه جهت بهبود ساختار هندسی و مکانیکی حلقه لازم است. در این پژوهش به تخمین عمر و پیش‌بینی مکان خرابی غلتک‌های نورد حلقه پرداخته شده است. با شبیه‌سازی فرایند نورد حلقه جهت تولید یک نمونه اسپول موتور، تاریخچه بارگذاری غلتک‌ها در طی فرایند استخراج گردید. با توجه به تاریخچه بارگذاری مقدار تنش‌های ترمومکانیکی ایجاد شده در غلتک‌ها در یک سیکل بارگذاری تعیین و در ادامه با کمک روش تنش-عمر و روش‌های مختلف آسیب‌تجمعی، تخمین عمر انجام گردید. با اعمال نیروهای ترمومکانیکی غلتک اصلی به طور قابل ملاحظه‌ای تحت تاثیر تنش‌های مکانیکی و مندرل متأثر از تنش‌های حرارتی است. جهت افزایش عمر مندرل و کاهش اثرات مخرب تنش‌های ترمومکانیکی می‌بایست دمای غلتک‌ها در حین کارکرد تا حد امکان در محدوده دمای اولیه آنها باقی بماند. خنک‌کاری متناسب با دمای اولیه مندرل تاثیر قابل ملاحظه‌ای بر افزایش عمر آن خواهد داشت. در ضمن اثر تنش خمشی حاصل از شکل‌دهی اسپول مورد نظر بر روی عمر مندرل قابل توجه نیست. با توجه به نتایج حاصل از پژوهش مشخص گردید که پاسخ ترمومکانیکی غلتک‌ها نورد حلقه گرم به هنگام شکل‌دهی کاملاً متفاوت است. احتمال خرابی و ایجاد ترک به واسطه نیروهای ترمومکانیکی در غلتک اصلی و مندرل به ترتیب در زیر و روی سطح آنها است.

واژه‌های کلیدی: تخمین عمر، نورد حلقه، آباکوس، آسیب‌تجمعی

## Ring rolling work rolls life estimation by means of Manson-Halford-Haibach method

Ali Negahban, Mostafa Livani, Mohsen Dehghani and Mohammad Nikuyi

### Abstract

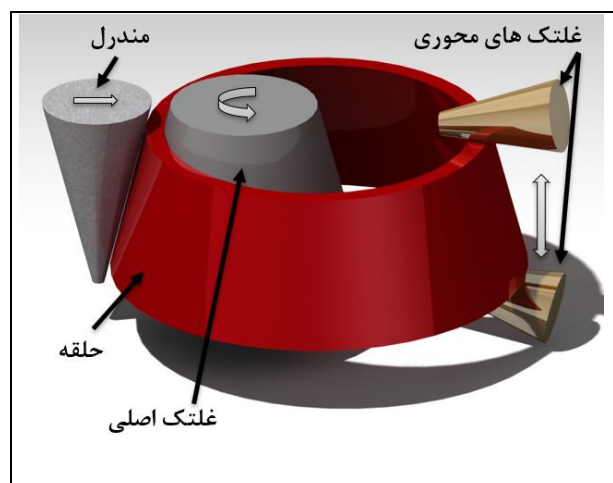
Ring rolling process is used in the production of seamless rings. The most important advantages of these rings are favorable grain flow and crack growth resistance. Aircraft engine spools are usually produced by means of this process. Failure of the work rolls during forming of spools leads to unacceptable microstructure, geometrical structural and irreparable damages. Evaluation of the work rolls conditions of the ring rolling machine has a direct effect on the geometrical and mechanical properties of the output ring. By making use of Abaqus simulation, the loading history was extracted and applied to the work rolls. According to the loading history, stress-life method and cumulative damage relations were performed. The main-roll is significantly affected by mechanical stresses. On the other hand, the mandrel is affected by thermal stresses. In general, the proper cooling has a significant effect on the service life of the mandrel. In addition, the effect of bending stresses on the mandrel's life is not significant. The results of the research show that the responses of the work rolls to thermo-mechanical loads are completely different. The probability of damage and crack initiation due to thermo-mechanical loads in the main-roll and mandrel are below and on the work rolls surface, respectively.

**Key words:** Life estimation, Ring rolling, Abaqus, Cumulative damage

## مقدمه

پیچیده و زمان‌بر است. آسیب‌های مختلفی از قبیل اکسیداسیون، خستگی خوردگی، خستگی سایشی، خستگی ترمومکانیکی و اندر کنش آن‌ها در غلتک‌های نورد گرم رخ می‌دهد. جهت تولید اقتصادی محصول لازم است تا ارزیابی دقیقی از آسیب‌های ایجاد شده در غلتک هنگام تولید انجام گیرد. یکی از عوامل تخریب در غلتک‌ها خستگی ترمومکانیکی آن‌ها می‌باشد. تنش‌های ترمومکانیکی در غلتک به علت تماس با فلز داغ و نیروهای ناشی از نورد حاصل می‌گردند. تنش‌های تکراری با دامنه متغیر می‌توانند سبب خستگی، تغییر شکل و خردشدگی غلتک‌ها شوند. غلتک‌ها در نورد معمولاً به گونه‌ای طراحی می‌گردند که به هنگام شکل‌دهی قطعه در محدوده الاستیک باقی مانده و کمترین تغییر شکل را داشته باشند. از سوی دیگر در فرایند شکل‌دهی سوپراآلیاژها با نورد حلقه گرم به دلیل متناوب بودن شکل‌دهی، کنترل دمایی حلقه و غلتک برای استحصال خواص مطلوب امری اجتناب ناپذیر است لذا آگاهی از پاسخ ترمومکانیکی غلتک‌ها در حین شکل‌دهی حلقه لازم می‌باشد.

خستگی یک فرایند آسیب موضعی قطعه است که به‌وسیله‌ی بارگذاری چرخه‌ای به وجود آمده است. هدف تخمین عمر در قطعات مختلف می‌تواند از یکی به دیگری تغییر کند، دانستن چگونگی عمر مفید مصرف‌شده در یک قطعه یک امر لازم برای به دست آوردن یک فاصله صحیح برای بازرسی، تعمیر و تجدید عمر است [۱]. تاکنون روش‌های مختلفی جهت ارزیابی عمر قطعات ارائه شده است. به‌طور کلی در طراحی و پیش‌بینی زمان خرابی قطعات زیر بارهای نوسانی و پیدایش خستگی در قطعه، سه روش اصلی به کار می‌رود هر کدام از این روش‌ها از یک دیدگاه به مکانیزم خستگی می‌پردازند: [۲]



شکل ۱- شماتیک دستگاه نورد حلقه شعاعی - محوری

نورد حلقه گرم یک فرآیند شکل‌دهی تدریجی با اثرات ترمومکانیکی است. در سال‌های اخیر با افزایش تقاضا در صنایع پیشرفته برای حلقه‌های بدون درز از مواد گران قیمت و آلیاژهای خاص، نورد حلقه گرم به فرآیند مرجع برای تولید این حلقه‌ها تبدیل شده است. فرایند با گرم کردن شمشال با حجم مشخص شروع می‌شود سپس قطعه زیر پرس قرار گرفته و سطح آن افزایش می‌یابد و در ادامه توسط یک سنبه در داخل آن سوراخی ایجاد می‌شود که جهت فرایند نورد در دستگاه نورد حلقه استفاده می‌گردد. با قرار دادن قطعه پیش‌فرم در دستگاه و حرکت مندرل به سمت غلتک اصلی، ضخامت حلقه کاهش یافته و شعاع آن افزایش می‌یابد و تا رسیدن قطعه به شعاع دلخواه فرایند ادامه می‌یابد. توسط غلتک‌های محوری امکان تغییر ارتفاع حلقه نیز وجود دارد. در شکل ۱ شماتیک دستگاه نورد حلقه شعاعی - محوری نشان داده شده است. صرفه‌جویی در هزینه مواد و انرژی، کیفیت و بازدهی بالا و مقاومت در برابر رشد ترک از عمده‌ترین دلایل تولید حلقه بدون درز با این روش هستند. حلقه‌های تولیدی به این روش کارکردهای مهمی را در صنایع مختلف دارند لذا کوچک‌ترین آسیب در آن‌ها ممکن است منجر به صدمات جبران ناپذیری گردد.

به‌طور خلاصه فاکتورهایی که پیش‌بینی رفتار دستگاه را در طی فرآیند نورد حلقه پیچیده می‌نمایند عبارت‌اند از:

- عدم تقارن نورد به خاطر تفاوت در شعاع غلتک‌ها (در راستای شعاعی)
- غلتک‌های غیر استوانه‌ای و تغییر در قطر غلتک‌ها (در راستای محوری)
- وجود تنها یک غلتک محرک (در راستای شعاعی)
- تغییر قطر حلقه نسبت به زمان و تغییر در سطح تماس حلقه و غلتک‌ها
- کاهش پیوسته ضخامت و ارتفاع حلقه
- تغییر شکل‌های سه‌بعدی حلقه در هنگام نورد
- تغییر نیرو و گشتاور موردنیاز در حین نورد
- تغییر خصوصیات مکانیکی و حرارتی حلقه در زمان شکل‌دهی

جهت تخمین عمر و پیش‌بینی خرابی در غلتک‌ها لازم است تا از شرایط کاری و عوامل آسیب اطلاعات جامعی کسب نمود. تخمین عمر در غلتک‌های دستگاه نورد حلقه نسبت به سایر فرایندهای نورد، با در نظر گرفتن موارد ذکر شده، فرایندی

رفتار حرارتی و نیروی نورد را در نورد داغ ورق بررسی کردند. توزیع دما در ورق و غلتک توسط تحلیل المان محدود و نیروها توسط روش کران بالا حاصل شدند. بناسکیوتی و همکارانش [۸] با معرفی یک المان یک بعدی هارمونیک به بررسی غلتک نورد داغ به صورت دوبعدی پرداخته و تنش‌های ترمومکانیکی را در غلتک محاسبه نمودند. آن‌ها توانستند با استفاده از المان یک‌بعدی زمان تحلیل را نسبت به کارهای قبلی خود کاهش دهند. مرانی و همکارانش [۹] به بررسی دو بعدی نورد حلقه پرداختند و محدوده قابل قبول فرض کرنش صفحه‌ای را جهت شبیه سازی نورد حلقه تعیین نمودند. قیوم و همکارانش [۱۰] مقدار تنش‌های ترمومکانیکی تولید شده در غلتک از جنس H-11 در نورد سرد و داغ ورق‌های برنجی را به کمک نرم‌افزار آباکوس بررسی کردند. کوهبر [۱۱] با استفاده از روش المان محدود دوبعدی تنش‌های ترمومکانیکی در نورد گرم ورق را بررسی کرد. مدل المان محدود در ابتدا برای شرایط پایدار، پاسخ ترمومکانیکی ورق را محاسبه می‌کند و در ادامه این مقادیر برای تعیین شرایط مرزی مناسب بر روی غلتک اعمال می‌گردند. با استفاده از مدل مقدار تنش‌های ترمومکانیکی در غلتک نورد گرم را بررسی کرد و مشخص شد که در نواحی تماس و خنک کاری این تنش‌ها قابل ملاحظه است. اسکولان و همکارانش [۱۲] روشی جهت ارزیابی تنش‌های ترمومکانیکی در ابزارهای شکل‌دهی در دمای گرم ارائه دادند. آن‌ها با استفاده از نرم‌افزار آباکوس به بررسی تنش‌های ترمومکانیکی و با جمع خطی آسیب ناشی از اکسیداسیون و خستگی ترمومکانیکی به ارزیابی عمر قطعات پرداختند. نگهبان و همکارانش [۱۳] با استفاده از کدنویسی در نرم افزار آباکوس به ارزیابی تنش‌های حرارتی و ترمومکانیکی در غلتک‌های نورد حلقه پرداختند. آنها با ارائه روش جدیدی توانستند زمان شبیه‌سازی را به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش دهند. در فعالیت دیگری [۱۴] آنها اثر خنک کاری را بر روی تنش‌های ترمومکانیکی غلتک‌های نورد حلقه بررسی کردند. هو و همکارانش [۱۵] با شبیه‌سازی تنش‌های حرارتی ایجاد شده در غلتک‌های نورد به بررسی عمر و تاثیر تنش‌های پسماند پرداختند. نتایج تحقیق نشان می‌دهد خنک کاری نامناسب سبب افزایش دما و تنش‌های فشاری در سطح و تنش کششی زیادی در زیر سطح غلتک می‌شود. در ادامه به کمک روش کرنش-عمر به ارزیابی عمر غلتک پرداختند. ویدلیچ و همکارانش [۱۶] تاثیر پارامترهای عملکردی دستگاه نورد گرم ورق را بر خستگی حرارتی و خرابی سطح ورق

۱. دیدگاه تنش عمر (S-N) که در دهه ۱۸۵۰ ارائه شد.
۲. دیدگاه کرنش عمر ( $\epsilon - N$ ) که برای اولین بار در دهه ۱۹۶۰ ارائه شد.
۳. دیدگاه رشد ترک خستگی ( $da/dN - \Delta K$ ) در دهه ۱۹۶۰ فرمول‌بندی شد.
۴. مدل دومرحله‌ای که ترکیبی از مدل‌های ۲ و ۳ است. در این روش مدل ۲ برای تعیین زمان پیدایش ترک خستگی و مدل ۳ برای رشد ترک خستگی به کار می‌رود.

روش‌ها بر پایه تنش یکی از قدیمی‌ترین راه‌های تخمین عمر هستند که از اواسط قرن نوزدهم معمول شده‌اند و به روش S-N نیز شهرت دارند. در مواردی که تنش‌های سیکلی، پارامتر تعیین‌کننده بوده و تغییر شکل‌های پلاستیک در قطعه کم باشند این روش در عمرهای بیشتر از  $10^3 - 10^4$  از دقت کافی برخوردار می‌باشد [۳]. در این روش، عمر قطعه با استفاده از نمودار S-N نمونه استاندارد تخمین زده می‌شود. با استفاده از ضرایب تصحیح مناسب تغییرات لازم در این نمودار اعمال می‌شود و در صورتی که تنش‌ها و عمر تقریبی در محدوده قابل قبول بود از روش تنش-عمر استفاده می‌شود.

از اوایل دهه ۷۰ قرن بیستم فعالیت‌های مختلفی جهت بررسی غلتک‌ها صورت گرفت. این پژوهش‌ها به دلیل ساده‌سازی‌های زیاد، صرفاً جهت ارزیابی کلی غلتک‌ها کاربرد داشت. از دهه ۸۰ به بعد تحلیل‌های عددی بخش عمده‌ای از پژوهش در این حوزه را به خود اختصاص داده است. فرایند نورد تاکنون از دیدگاه‌های مختلفی از جمله کنترل و بهینه‌سازی فرایند، تخمین نیرو و گشتاور مورد نیاز شکل‌دهی، بررسی ریز ساختار و آسیب در قطعه و غلتک‌ها بررسی شده است. ژانگ و همکارانش [۴]. معیار تسلیم جدیدی برپایه معیار تسلیم ون-میزز و ترسکا ارائه دادند و با کمک آن به تخمین نیرو و گشتاور مورد نیاز در نورد صفحه پرداختند. دوو و همکارانش [۵] به بررسی ریز ساختار ورق جوشکاری شده بعد از فرایند نورد پرداختند. زو و همکارانش [۶] به بررسی مکانیزم ارتعاشات ناشی از سر خوردن ورق در نورد پرداختند. نتایج تحقیق نشان می‌داد که تنش‌های برشی ناپایدار در سطح تماس سبب بروز ارتعاش و سایش در سطح می‌شوند. تاکنون تحقیقات فراوانی در رابطه با تخمین دما، تنش‌های حرارتی یا ترمومکانیکی و تعیین عمر در غلتک دستگاه‌های نورد صورت گرفته است. سیادی و سراج‌زاده [۷] با استفاده از کوپل المان محدود و روش کران بالا

اختلاف درجه حرارت ( $\theta$ ) مشخص شود. برای فرمول‌بندی المان محدود یک المان در نظر گرفته می‌شود و تابع میدان توسط آن تقریب زده می‌شود. با توجه به اصول کلی روش، مجهولات محلی ( $u_i, v_i, w_i, \theta_i$ ) و تابع شکل مناسب ( $N_i^d, N_i^\theta$ ) مشخص می‌شود. با فرض اینکه مقادیر گره‌ای تابع پیوسته از زمان باشند، گسسته‌سازی مکان و زمان در توابع شکل امکان‌پذیر است.

$$u_i^E = (x, y, z, t) = \sum_{m=1}^n U_{im}(t) N_m^d(x, y, z) \quad (1)$$

$$\theta^E = (x, y, z, t) = \sum_{m=1}^n \theta_m(t) N_m^\theta(x, y, z)$$

در رابطه ۱ اندیس  $n$  نشان‌دهنده تعداد گره‌ها در المان می‌باشد. با مرتب‌سازی مجهولات المان و توابع شکل به صورت ماتریسی طبق رابطه ۲ مشخص می‌شود.

$$\delta^E = \begin{bmatrix} d^E \\ \theta^E \end{bmatrix}, d^E = \begin{bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ w_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ u_n \\ v_n \\ w_n \end{bmatrix}, \theta^E = \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ \theta_n \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$N = \begin{bmatrix} N^d & 0 \\ 0 & N^\theta \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$$N^d = \begin{bmatrix} N_1^d & 0 & 0 & \dots & N_n^d & 0 & 0 \\ 0 & N_1^d & 0 & \dots & 0 & N_n^d & 0 \\ 0 & 0 & N_1^d & \dots & 0 & 0 & N_n^d \end{bmatrix}$$

$$N^\theta = \begin{bmatrix} N_1^\theta & \dots & N_n^\theta \end{bmatrix}$$

$\delta$  ماتریس مجهولات محلی مکانی و دما است. تقریب متغیرهای میدان در یک المان را می‌توان به صورت رابطه ۴ نمایش داد.

$$\begin{bmatrix} u^E \\ v^E \\ w^E \\ \theta^E \end{bmatrix} = N \delta^E \quad (4)$$

معادلات مورد نیاز جهت بررسی حالت کوپل ترمومکانیکی به کمک معادلات حرکت و انرژی و استفاده از روابط سازگاری حاصل می‌شود. با تقریب معادله حرکت با روش المان محدود

بررسی کردند. آنها با تعریف ضریب خرابی سطح به تخمین عمر غلتک پرداختند. پالیست و همکارانش [۱۷] مکانیزم خرابی پیش‌رونده در غلطک‌های نورد ورق را بررسی کردند. با استفاده از آزمون غیرمخرب التراسونیک محل شروع ترک روی سطح مشخص شد، این ترک به هنگام کارکرد به سمت زیر سطح منتقل شده و سبب خرابی غلتک شده است. تولچا و همکارانش [۱۸] با کدنویسی در آباکوس به بررسی تنش‌های ایجاد شده در غلتک نورد پرداختند. آنها اندرکنش خزش-خستگی را با استفاده از شبیه‌سازی در غلتک‌ها بررسی کردند. هادی‌زاده و همکارانش [۱۹] خرابی غلتک‌های ترمیم شده با جوش را در نورد گرم ورق بررسی کردند. با استفاده از آزمون‌های غیر مخرب بر روی غلتک محل شروع خرابی بین مسیره‌های جوشکاری شده تعیین گردید.

با بررسی تحقیقات صورت گرفته درباره تخمین عمر غلتک‌های نورد و پیش‌بینی مکان خرابی مشخص می‌شود که اکثر تحقیقات در حوزه خستگی غلتک‌های نورد صفحه یا ورق بوده و کمتر به نورد حلقه پرداخته شده است. از آنجایی که شرایط هندسی، مکانیکی و حرارتی در نورد حلقه کاملاً با نورد صفحه متفاوت می‌باشد، غلتک‌ها پاسخ‌های حرارتی و مکانیکی متفاوتی به این بارها نشان خواهند داد. اکثر تحلیل‌هایی که تاکنون در نورد ورق صورت گرفته جهت تحلیل نورد حلقه صادق نبوده و فرضیات آن‌ها از قبیل تقارن، سطح تماس یکسان، کار سختی و ثابت بودن دمای قطعه کار، نیرو و گشتاور وارد به غلتک‌ها نیاز به تغییرات کلی دارد. در این پژوهش به بررسی تنش‌های ترمومکانیکی بر روی غلتک‌های نورد حلقه با اعمال کلیه شرایط مرزی، خصوصیات هندسی و ترمومکانیکی متغیر در نورد حلقه پرداخته شده است.

### تخمین تنش ترمومکانیکی به کمک المان محدود

جهت ارزیابی تنش ترمومکانیکی در اجزا دست‌گناه‌ها، با شرایط مرزی متغیر و رفتار ناهمگن مواد معمولاً از روش‌های عددی استفاده می‌شود که روش المان محدود از مقبولیت مناسبی برخوردار است. در ابتدا معادلات حاکم بر سیستم توسط روش‌های عددی مختلف گسسته می‌شود و مجهولات محلی به کمک توابع شکل مناسب تقریب زده می‌شود. در ادامه جداسازی معادلات به روش باقی‌مانده وزنی گالرکین بررسی می‌شود. در حالت سه‌بعدی می‌بایست سه بردار جابجایی  $u$  (در راستای  $x$ ) و  $v$  (در راستای  $y$ )،  $w$  (در راستای  $z$ ) و همچنین

که  $[M]$ ،  $[C]$ ،  $[K]$  به ترتیب ماتریس سفتی، دمپینگ و جرم می‌باشند. با استفاده از شرایط اولیه و مرزی مدل، ماتریس‌های فوق برای تعیین مجهولات استفاده می‌شوند.

به‌طور کلی در نرم‌افزارهای المان محدود تجاری نظیر آباکوس و انسیس از روابط ذکر شده جهت تشکیل ماتریس‌های جرم، دمپینگ و سفتی استفاده می‌شود که آگاهی از این روابط به درک درست از فرایند حل المان محدود در نرم‌افزار خواهد شد. در آباکوس شبیه‌سازی خنک کاری موضعی قطعات متحرک در یک نقطه مشخص، به‌طور مستقیم و استفاده از محیط گرافیکی آباکوس امکان‌پذیر نیست. آباکوس برای شبیه‌سازی شرایط مرزی پیچیده غلتک‌ها تنها در تحلیل حرارتی چند سابروتین (Film-DFlux-...) ارائه داده است اما برای تحلیل ترمومکانیکی غلتک‌ها سابروتینی موجود نیست. جهت شبیه‌سازی خنک کاری موضعی و پیاده‌سازی شرایط موردنظر کدنویسی در نرم‌افزارهای المان محدود از قبیل انسیس یا آباکوس اجتناب‌ناپذیر است. در آباکوس نیاز است تا با استفاده از کد نویسی شرایط مرزی متغیر و موضعی تعیین گردد. الگوریتم کلی مورد استفاده در کدنویسی به زبان پایتون بدین صورت است که هر مدل از تعداد زیادی زیر مدل تشکیل شده است، که در هر کدام از آن‌ها شرایط مرزی با توجه به سرعت غلتک تغییر می‌کند. با توجه به کمبود تحلیل و شبیه‌سازی‌های ترمومکانیکی در نورد حلقه جهت بررسی دقت نتایج شبیه‌سازی‌ها به روش‌های مختلف، از داده‌های نورد صفحه استفاده گردید و نتایج با مقاله بناسکیوتی و همکارانش [۸] مقایسه شد. مدل المان محدود شبکه‌بندی متناسب با پژوهش موردنظر است. از المان خطی چهار گره‌ای CPE4RT در غلتک استفاده شد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی با مدل‌های مختلف در شکل ۲ نشان داده شده است. تغییرات دمایی یک گره واقع بر روی سطح طی زمان مشخص شده است. همان‌طور که در شکل مشخص است نحوه تغییرات دما در مدل‌ها به یک شکل می‌باشد بدین معنی که با ورود گره سطحی به ناحیه تماسی با صفحه ناگهان دمای آن افزایش می‌یابد و بیشترین دما در حین خروج از این ناحیه مشخص می‌شود. با خروج گره دمای آن با نرخ مشخصی به دلیل انتقال حرارت به گره‌های داخلی و محیط کاهش می‌یابد. هنگامی که گره به ناحیه خنک کاری می‌رسد با ورود به این منطقه نرخ کاهش دما در آن بیشتر شده و شیب نمودار تغییر می‌کند لذا در ابتدای ناحیه خنک کاری در نمودار دمایی شکستی پدیدار می‌شود. با خروج گره از ناحیه

رابطه ۵ حاصل می‌شود با کمک روش باقی مانده وزنی خطای ناشی از این تقریب جبران خواهد شد.

$$\sigma^E \cdot \nabla + F - \rho \dot{u}^E \neq 0 \quad (5)$$

در روش باقی‌مانده وزنی گالرکین، تابع وزن همان تابع شکل می‌باشد. با توجه به اینکه توابع شکل وابسته به مختصات محلی هستند، توابع شکل جابجایی و دما  $(N_i^d, N_i^\theta)$  یکسان فرض می‌شود که در آن  $m$  تعداد گره‌ها در المان است.

$$\int_{V^e} N_m \cdot (\sigma_{ij,j} + F_i - \rho \dot{u}_i) dV = 0 \quad (6)$$

$$m = 1, 2, \dots, n$$

که در آن  $\sigma_{ij}$  مولفه‌های تانسور تنش،  $F$  بردار نیروهای خارجی و  $\rho$  چگالی است. با اعمال فرم ضعیف شده، رابطه کوشی و رابطه بین تانسور تنش و بردارهای نیروی سطحی در مرزها و همچنین قانون هوک و رابطه تانسور تنش و کرنش رابطه فوق به‌صورت زیر حاصل می‌گردد که تقریب المان محدود معادله حرکت می‌باشد [۲۰]:

$$\left( \int_{V^e} \rho N_l N_m dV \right) \ddot{U}_{mi} + \left( \int_{V^e} G \frac{\partial N_l}{\partial x_j} \frac{\partial N_m}{\partial x_j} dV \right) U_{mi} + \left( \int_{V^e} G \frac{\partial N_l}{\partial x_j} \frac{\partial N_m}{\partial x_i} dV \right) U_{mj} + \left( \int_{V^e} \lambda \frac{\partial N_l}{\partial x_i} \frac{\partial N_m}{\partial x_j} dV \right) - \left( \int_{V^e} \beta \frac{\partial N_l}{\partial x_i} N_m dV \right) \theta_m = \int_{V^e} F_i N_l dV + \int_{A^e} t_i N_l dA \quad (7)$$

$$l, m = 1, 2, \dots, n \quad i, j = 1, 2, 3$$

در این رابطه  $G$  مدول برشی،  $\lambda$  ثابت الاستیک لامه،  $\beta$  تانسور ترموالاستیسیته و  $t$  مؤلفه‌های بردارهای مرزی بر روی سطح هستند. معادله انرژی با استفاده از روش باقی‌مانده وزنی و تقریب گالرکین نیز به‌صورت رابطه ۸ حاصل می‌گردد [۲۰]:

$$\left( \int_{V^e} k \frac{\partial N_l}{\partial x_i} \frac{\partial N_m}{\partial x_i} dV \right) \theta_m - \left( \int_{V^e} T_0 \beta \frac{\partial N_m}{\partial x_i} N_l dV \right) \dot{U}_{mi} + \left( \int_{V^e} \rho c N_m N_l dV \right) \dot{\theta}_m = \int_{V^e} R N_l dV - \int_{A^e} (\vec{q} \cdot \vec{n}) N_l dA \quad (8)$$

که در آن  $k$  رسانش گرمایی،  $R$  توان منبع حرارتی در واحد جرم،  $q$  شار حرارتی،  $c$  ظرفیت حرارتی و  $T_0$  دمای اولیه هستند. با قرار دادن معادلات ۷ و ۸ در یک ماتریس معادله کوپل المان محدود حاصل می‌گردد.

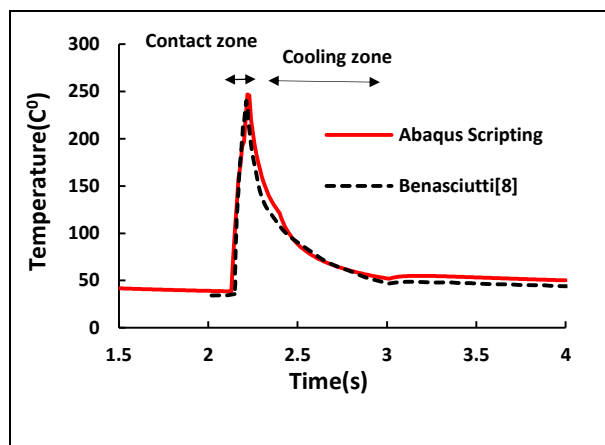
$$[M]\{\delta\} + [C]\{\dot{\delta}\} + [K]\{\delta\} = \{F\} \quad (9)$$

$$\sum \frac{n_i}{N_{fi}} = \frac{n_1}{N_{f1}} + \frac{n_2}{N_{f2}} + \dots = 1 \quad (10)$$

فرض خطی بودن آسیب، محل تردید و بحث‌های زیادی است. برای مثال، توالی و اندرکنش وقایع ممکن است اثر عمده‌ای بر روی عمر خستگی داشته باشند. همچنین سرعت انباشتگی آسیب، ممکن است تابعی از دامنه بار باشد، به طوری که در سطوح پایین‌تر بار، قسمت اعظم عمر شامل جوانه‌زنی ترک می‌شود در حالی که در سطوح بالاتر بار، بیشتر عمر صرف رشد ترک می‌شود. برای اصلاح نقایص و کمبودهای مربوط به فرض خطی بودن آسیب، قوانین آسیب خستگی انباشته غیرخطی زیادی ارائه شده است. این تئوری‌ها برای بیان طبیعت غیرخطی انباشتگی آسیب خطی، توسط روابط غیرخطی همچون  $D = \sum (n_i / N_{fi})^{\alpha_i}$  بیان می‌شوند. توان  $\alpha_i$  بیشتر به سطح بار بستگی دارد. فاطمی و یانگ [۲۱] بیشتر از ۵۰ رابطه برآورد آسیب را بررسی و در شش طبقه کلی دسته‌بندی نمودند و مشخص شد علیرغم پیشرفت در مدل‌های برآورد آسیب هیچ‌کدام از آن‌ها از دقت و مقبولیت کافی برخوردار نیستند. از آنجایی که این مدل‌ها هر کدام برای شرایط خاصی مناسب می‌باشند باید کاربر با توجه به نیاز و نوع بارگذاری روش موردنظر را انتخاب کند. در ادامه به روش هایباخ و روش مانسون-هالفورد اشاره می‌شود. هر کدام از این روش‌ها به پدیده تجمع آسیب از زاویه متفاوتی توجه می‌کنند.

### روش پالمگرن-ماینر تغییر یافته (هایباخ)<sup>۲</sup>

خسارت ناشی از اعمال تنش‌های چرخه‌ای با اضافه کردن هر سیکل افزایش می‌یابد. مفهوم پایه این است که رفتار ماده با اعمال بارگذاری متناوب تغییر می‌کند و به‌طور طبیعی یک منحنی تنش-عمر جدید و متفاوت را نشان می‌دهند. در بررسی‌هایی که توسط محققین مختلف بر روی مقدار جمع آسیب انباشته به روش پالمگرن-ماینر بر روی مواد مختلف تاکنون انجام شده است این مقدار بین ۰/۱۵ تا ۱/۰۶ قرار دارد. بر اساس نتایج تجربی، هایباخ [۲۲] جمع آسیب بحرانی برای فولادها، فولادهای ریخته‌گری و آلومینیوم مقدار ۰/۳ را پیشنهاد داده است. آسیب بحرانی برای آهن نرم و خاکستری مقدار ۱ پیشنهاد شده است. همان‌طور که توضیح داده شد در آزمایش‌های خستگی فولادها، نمودار S-N دارای زانویی است و فرض می‌شود در دامنه تنش کمتر از حد دوام خستگی، هیچ‌گونه شکست و آسیبی به قطعه وارد نمی‌شود. در قانون



شکل ۲: مقایسه دمای سطح غلتک

خنک‌کاری به دلیل کاهش دمای بیشتر نسبت به گره‌های داخلی جهت شار حرارتی تغییر کرده و دمای گره به‌مرور افزایش خواهد یافت. به‌طور کلی پیش‌بینی دما با استفاده از کدنویسی در آباکوس دما را کمی بیشتر (اختلاف کمتر از ۰/۱) پیش‌بینی می‌کنند.

زمان تحلیل با استفاده از کامپیوتر شخصی با مشخصات (Core i7-4790-3.5GHz, RAM-16G) جهت شبیه‌سازی در حدود ۱۰ ساعت زمان احتیاج دارد. در مدل موردبحث تحلیل حرارتی تا حالت پایدار توسط بناسکیوتی در حدود ۳ روز و تحلیل ترمومکانیکی برای ۴۳ ثانیه به ۱۰ روز زمان احتیاج داشته است که در مجموع ۱۳ روز زمان برده است. الگوریتم مورد استفاده در پژوهش حاضر توسط نگهبان و همکارانش [۱۳] به‌طور کامل شرح داده شده است.

### بارگذاری متغیر و روش پالمگرن-ماینر

به‌طور معمول اکثر دستگاه‌ها در هنگام کارکرد تاریخچه بارگذاری با دامنه متغیر را تجربه می‌کنند. یک رویکرد به تاریخچه بارگذاری متغیر که با مفهوم «آسیب» همراه است با عنوان نسبتی از عمر معرفی می‌شود. هرگاه مجموع این نسبت برابر با یک یا ۱۰۰٪ شود باید انتظار شکست را داشت. آسیبی که در اثر یک چرخه رخ می‌دهد به‌صورت  $D = 1 / N_f$  تعریف می‌شود که  $N_f$ ، تعداد چرخه معادل با عمر متوسط در دامنه تنش مشخص تا واماندگی است. آسیب تولیدشده توسط  $n$  چرخه برابر است با  $nD = n / N_f$ . رابطه ۱۰ قانون آسیب خطی را بیان می‌کند که توسط پالمگرن برای تخمین عمر بلبرینگ و بعدها توسط ماینر برای تخمین عمر خستگی هواپیما پیشنهاد شد. این رابطه با دیگر منحنی‌ها خستگی مانند بار-عمر و کرنش-عمر به کار برده می‌شود [۲].

در بارگذاری‌های بعدی اگر سازه تحت باری با تعداد سیکل  $n_2$  قرار گیرد به علت اینکه سازه قبلاً تحت بارگذاری قرار گرفته و مقداری آسیب در جسم انباشته شده است، این تعداد سیکل به کمک رابطه ۱۲ معادل‌سازی شده است. با توجه به آسیب انباشته شده در سازه داریم:

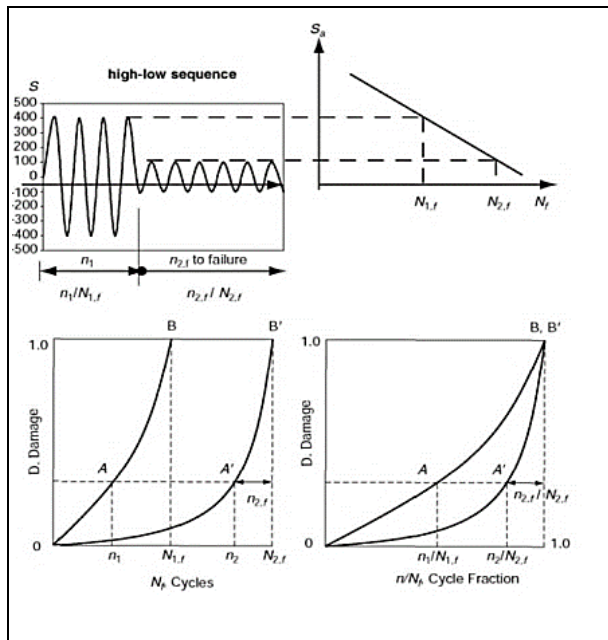
$$n_{2,eq} = N_2 \cdot [D_1] \left( \frac{N_{ref}}{N_2} \right)^{0.4} \quad (12)$$

در این رابطه  $N_{ref}$  عمر مرجع و کمترین عمر در یک بلوک بارگذاری است. به‌عنوان تعداد سیکل معادل‌سازی شده با توجه به مقدار آسیب انباشته شده است. مقدار آسیب در بارگذاری دوم برابر است با:

$$D_2 = \left[ \frac{n_{2,eq} + n_2}{N_2} \right] \left[ \frac{N_2}{N_{ref}} \right]^{0.4} \quad (13)$$

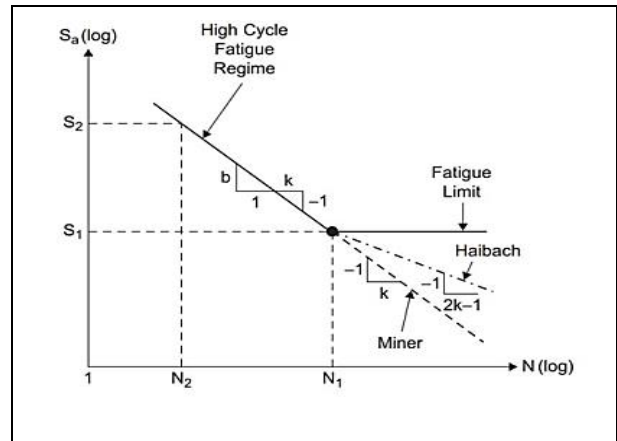
با توجه به شکل ۴ می‌توان مقدار آسیب هر بارگذاری با توجه به آسیب مانسون- هالفورد را مشاهده کرد. با اعمال سیکل اول بارگذاری (تنش با دامنه بزرگ‌تر) آسیب ایجاد شده به نقطه A می‌رسد و آسیب ایجاد شده معادل  $n_1$  است. با شروع موج دیگر بارگذاری در بلوک نقطه A به صورت افقی به A' منتقل می‌شود و  $n_{2,f}$  سیکل را تا شکست تحمل می‌کند. همان‌طور که مشخص است در صورتی که ترتیب بارگذاری تغییر کند مقدار آسیب محاسبه شده کاملاً متفاوت خواهد بود.

نظریه‌های قانون توانی آسیب جمععی مربوط به سه روش مختلف، به‌وسیله مانسون و همکارانش با داده‌های آزمون بر



شکل ۴: بلوک بارگذاری دو مرحله‌ای و آسیب ایجاد شده در آن [۲۴]

خطی پالمگرن-ماینر نیز در حالتی که اندازه تنش متناوب از حد خستگی کمتر باشد هیچ‌گونه آسیبی به قطعه وارد نمی‌شود. مقایسه بین نتایج پیش‌بینی عمر با کارکرد واقعی نشان می‌دهد که عمر قطعه واقعی کمتر است. از این رو تغییراتی در محدوده عمر نامحدود توسط محققین انجام شده است تا اثرات تخریبی تنش‌های کوچک‌تر از حد دوام را نیز شامل شود. طبق شکل ۳ دو مدل متفاوت ماینر و هایباخ-ماینر نشان داده شده است. هایباخ [۲۳] فرض می‌کند که فاکتور شیب خط  $(k = \frac{-1}{b})$  در نقطه شروع زانویی به  $(2k-1)$  تبدیل می‌شود. این کاهش شیب نسبت به حالت افقی اثرات تخریبی تنش‌های تناوبی کوچک‌تر از حد دوام را در بر می‌گیرد. در این روش، عدم قطعیت در نتایج حاصل از تجمع آسیب انباشته و نتایج تجربی حاصل از جمع خطی یا غیرخطی آسیب در هر بارگذاری نیست. در این مدل فرض می‌شود که نتایج غیرواقعی به دلیل عدم نظر گرفتن آسیب ایجاد شده ناشی از تنش‌های کوچک‌تر از حد دوام هستند.



شکل ۳: منحنی S-N قانون پالمگرن-ماینر و تغییر یافته آن [۲۳]

### روش مانسون-هالفورد<sup>۳</sup>

آسیب ایجاد شده در قطعه را می‌توان بر اساس رشد ترک تا حداکثر اندازه ترک قابل تحمل سازه تعریف کرد. مانسون-هالفورد آسیب انباشته در قطعه را بر اساس معادله رشد ترک در سازه بیان نمودند. آن‌ها معادله توانی آسیب را بر پایه روابط تجربی رشد ترک در سازه تعریف نمودند. رابطه به این صورت است که سازه تحت بارگذاری در ابتدا عمر و خسارتی همانند معادله پالمگرن-ماینر دارد یعنی [۲۴]:

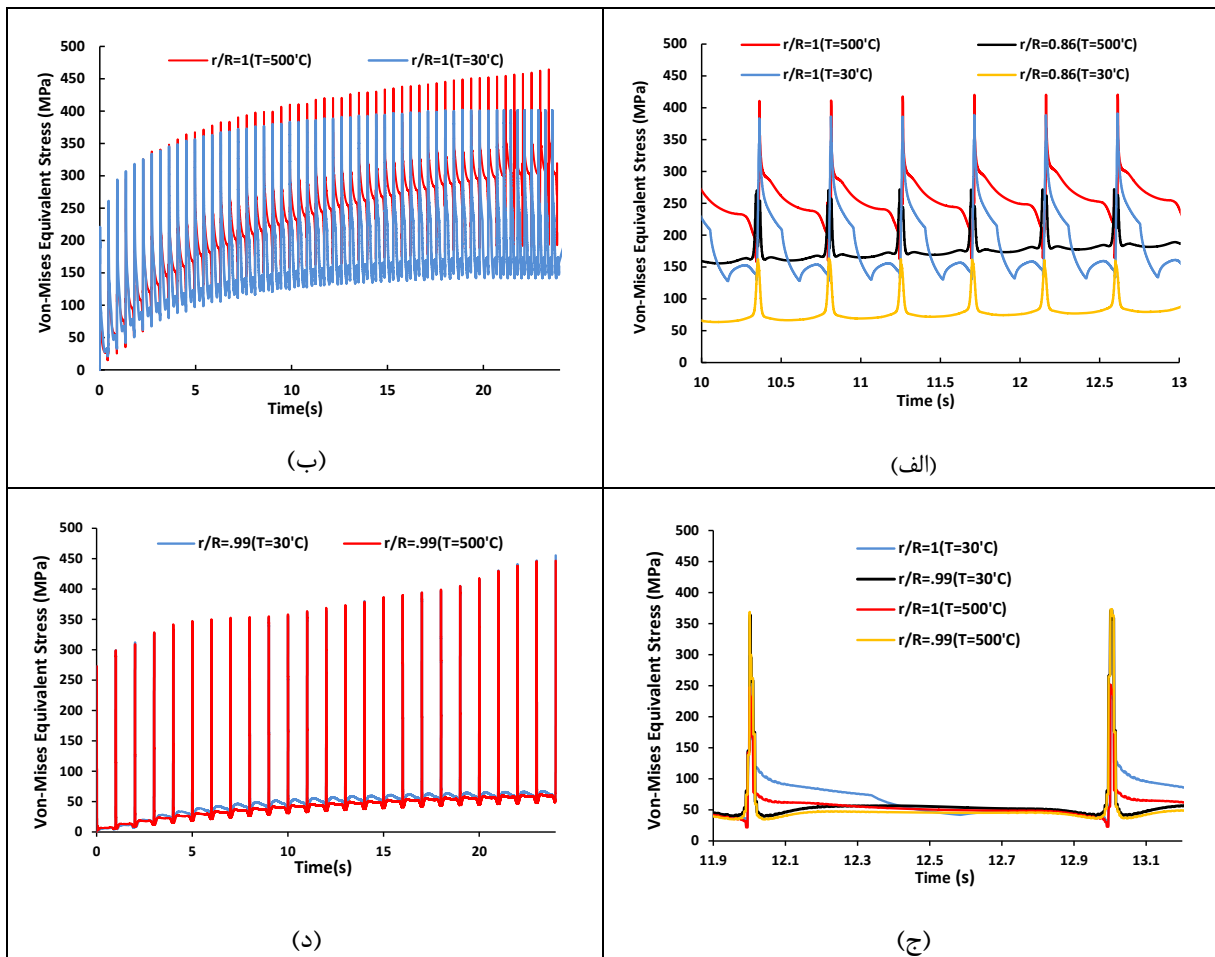
$$D_1 = \frac{n_1}{N_1} \quad (11)$$

حلقه طبق پژوهش [۹] می‌باشد. دو دمای اولیه برای غلتک‌ها در نظر گرفته شده است در حالی که دمای اولیه غلتک‌ها ۳۰ °C است خنک‌کاری با آب بر روی آن انجام می‌شود. در حالت دیگر دمای اولیه غلتک‌ها برای جلوگیری از پدیده سرد شدن ناگهانی قطعه کار، ۵۰۰ °C در نظر گرفته شده و هیچ خنک‌کاری بر روی غلتک‌ها انجام نمی‌شود. طبق نظریه هر تیز به هنگام تماس دو استوانه با یکدیگر ماکزیمم تنش معادل در زیر سطح رخ می‌دهد. مکان این تنش وابسته به شرایط هندسی استوانه‌ها است. با اعمال نیروی مکانیکی به غلتک‌ها مکان وقوع ماکزیمم تنش به صورت فاصله نرمال از مرکز غلتک تعیین گردید ( $r$  فاصله گره تا مرکز غلتک و  $R$  شعاع غلتک). با توجه به نتایج حاصل مشخص گردید که پاسخ ترمومکانیکی غلتک‌ها در نورد حلقه با یکدیگر متفاوت می‌باشند. طبق شکل ۵-الف مشخص است که بیشترین تنش در سطح مندرل و نسبت

روی فولاد ۴۱۳۰ مقایسه شدند. مشخص شد منحنی استخراج‌شده از روش مانسون-هالفورد به داده‌های آزمون نزدیک‌تر بوده و برای محاسبه آسیب مناسب‌تر است [۲۵]. در این روش ترتیب و اندازه بار و به‌عبارت‌دیگر تاریخچه بارگذاری بر روی آسیب انباشته تأثیر دارد. با توجه به نوع بارگذاری غلتک‌ها در نورد حلقه که در هر بار شکل‌دهی آن تاریخچه مشخصی بر روی غلتک‌ها اعمال می‌شود از این دیدگاه برای در نظر گرفتن تاریخچه بارگذاری بر آسیب انباشته در طول زمان سرویس‌دهی غلتک‌ها استفاده می‌شود.

### تخمین تنش ترمومکانیکی در غلتک

با استفاده از کد نرم افزاری آماده شده در محیط آباکوس، مقدار تنش‌های ترمومکانیکی ون میزز در غلتک‌های نورد حلقه تعیین گردید. خصوصیات هندسی و ترمومکانیکی غلتک‌ها و



شکل ۵: الف) تنش ون میزز ایجاد شده در سطح و زیر سطح مندرل ب) تاریخچه تنش ون میزز به هنگام شکل‌دهی اسپول در سطح مندرل ج) تنش ون میزز ایجاد شده در سطح و زیر سطح غلتک اصلی د) تاریخچه تنش ون میزز به هنگام شکل‌دهی اسپول در زیر سطح غلتک اصلی



N نیز شهرت دارند. در مواردی که تنش‌های سیکلی، پارامتر تعیین‌کننده بوده و تغییر شکل‌های پلاستیک در قطعه کم باشند این روش در عمرهای بیشتر از  $10^3 - 10^4$  از دقت کافی برخوردار می‌باشد. [۳] در این روش، عمر قطعه با استفاده از نمودار S-N نمونه استاندارد تخمین زده می‌شود. با استفاده از ضرایب تصحیح مناسب تغییرات لازم در این نمودار اعمال می‌شود و در صورتی که تنش‌ها و عمر تقریبی در محدوده قابل قبول بود از روش تنش-عمر استفاده می‌شود. جنس غلتک از آلیاژ H-13 می‌باشد و خصوصیات ترمومکانیکی آن طبق مرجع [۲۶] است. در بعضی از خواص ترمومکانیکی بسته به نیاز، از نقاط تجربی برازش منحنی صورت گرفته است. با توجه به اینکه داده‌های خستگی از نمونه‌های استاندارد حاصل می‌شوند، جهت استفاده از روش تنش-عمر می‌بایست نمودار برای شرایط موجود و هندسه قطعه با استفاده از ضرایب تصحیح مناسب اصلاح شود. از لحاظ اهمیت، عمر خستگی به دامنه تنش اعمالی وابسته است و در جایگاه دوم وابسته به تنش متوسط می‌باشد که می‌بایست اثر آن در نظر گرفته شود. عبارت‌های تجربی زیادی برای بیان اثر  $\sigma_m$  بر عمر خستگی وجود دارد. برای بیان اثر تنش متوسط مدل‌های متداول مختلفی وجود دارد. داوولینگ و همکارانش [۲۷] با بررسی‌های زیادی که بر روی آلیاژهای مختلف در نسبت تنش‌هایی بین ۲- تا ۰/۴۵ انجام دادند به این نتیجه رسیدند که روش گودمن کمترین دقت را دارد و خیلی محافظه‌کارانه است و نباید در طراحی استفاده شود. برای آلیاژهای فولادی روش مارو نتایج قابل قبولی ارائه می‌دهد [۲۷]. همچنین نتایج آزمون‌های خستگی تجربی نشان می‌دهد که نتایج روش گربر به واقعیت نزدیک‌تر است. روابط مربوط به روش‌های گودمن، مارو، گربر در ادامه توضیح داده شده است.

$$S_{ar} = \frac{S_a}{1 - \frac{S_m}{S_u}} \quad (۱۴) \text{ گودمن}$$

$$S_{ar} = \frac{S_a}{1 - \frac{S_m}{\sigma_f}} \quad (۱۵) \text{ مارو}$$

$$S_{ar} = \frac{S_a}{1 - \left(\frac{S_m}{S_u}\right)^2} \quad (۱۶) \text{ گربر}$$

در این روابط  $S_m$  تنش متوسط،  $S_a$  تنش متناوب اعمال شده،  $S_{ar}$  دامنه تنش کاملاً معکوس معادل،  $S_u$  استحکام کششی نهایی،  $\sigma_f$  استحکام شکست واقعی می‌باشند. باید توجه داشت

فاصله نرمال ۱ از مرکز غلتک رخ داده است این رفتار در غلتک‌های نورد صفحه نیز مشاهده می‌شود بدین معنی که در ناحیه تماس با ورق داغ ناگهان تنش‌های حرارتی و مکانیکی افزایش یافته و سبب افزایش قابل ملاحظه تنش معادل در این ناحیه می‌گردد. با خروج از ناحیه تماس، به علت نبود نیروهای مکانیکی تنش معادل ترمومکانیکی کاهش خواهد یافت. به دلیل سطح تماس زیاد مندرل با حلقه دمای آن افزایش می‌یابد و بعد از خروج از ناحیه تماس، در سطح مندرل تنش‌های حرارتی همچنان باقی می‌مانند و متاثر از شرایط مرزی تعریف شده هستند بدین معنی که با خنک‌کاری غلتک تنش‌های

حرارتی کاهش می‌یابند. فاصله نرمال ۰/۸۶ در زیر سطح مکانی است که در صورت اعمال بارهای مکانیکی به تنهایی، ماکزیمم تنش معادل در آن اتفاق می‌افتد. در شکل ۵-ب تاریخچه تنش‌های ترمومکانیکی ایجاد شده در سطح تماس مندرل با حلقه اسپول موتور نشان داده شده است. با توجه به شکل مشخص است که در انتهای فرایند مقدار تنش معادل معادل در غلتک با دمای اولیه  $500^\circ C$  تقریباً ۱۶٪ نسبت به حالت دیگر به دلیل عدم خنک‌کاری افزایش یافته است. تنش‌های ترمومکانیکی در غلتک اصلی در فاصله نرمال ۱ و ۰/۹۹ در شکل ۵-ج نشان داده شده است. با توجه به این شکل ماکزیمم تنش ترمومکانیکی در زیر سطح و فاصله نرمال ۰/۹۹ رخ می‌دهد که نشان‌دهنده سهم قابل توجه تنش‌های مکانیکی در تنش معادل است (فاصله نرمال ۰/۹۹ در زیر سطح مکانی است که در صورت اعمال بارهای مکانیکی به تنهایی، ماکزیمم تنش معادل در آن رخ می‌دهد). به دلیل تفاوت شرایط مرزی در سطح و دمای اولیه مختلف، مقدار تنش ترمومکانیکی متفاوت است ولی در زیر سطح و در فاصله نرمال ۰/۹۹ در هر دو دمای اولیه غلتک با وجود شرایط مرزی متفاوت، مقادیر تنش ترمومکانیکی تقریباً یکسان است. تاریخچه تنش‌های ترمومکانیکی ایجاد شده در غلتک اصلی در فاصله نرمال ۰/۹۹ از مرکز غلتک اصلی در شکل ۵-د نشان داده شده است. با توجه به این شکل مشخص است که ماکزیمم مقدار تنش ترمومکانیکی در غلتک اصلی در دو حالت دمایی با یکدیگر تفاوتی نداشته و تابع مقدار نیروی مکانیکی وارد بر آن است.

### روش تخمین عمر

روش‌های بر پایه تنش یکی از قدیمی‌ترین راه‌های تخمین عمر هستند که از اواسط قرن نوزدهم معمول شده‌اند و به روش S-

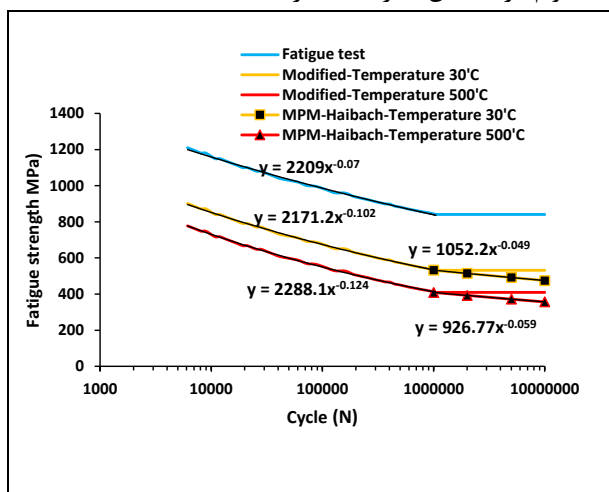
کشش نهایی بر اساس نتایج نمونه آزمایش را می توان به صورت رابطه ۱۷ در نظر گرفت:

$$S_{t,u} = C_R C_D C_T C_L C_\sigma S_{t,u,std} \quad (17)$$

که در آن  $S_{t,u,std}$  استحکام کشش نهایی نمونه استاندارد و  $C_R, C_D, C_T, C_L, C_\sigma$  به ترتیب ضرایب تصحیح قابلیت اطمینان، اندازه، دما، بار و تنش می باشند. با در نظر گرفتن سختی نمونه آلیاژ (48 HRC) مقدار استحکام کشش نهایی نمونه آزمایش [۳۰] و اعمال ضرایب مناسب [۲۲] [۲۸] مقدار استحکام کششی نهایی در دماهای  $30^\circ C$  و  $50^\circ C$  به ترتیب برابر  $1223/6$  و  $903$  مگاپاسکال است. با استفاده از مقادیر آزمون عملی حد دوام برای آلیاژ موردنظر و اعمال ضرایب مناسب می توان بهترین تقریب را برای حد دوام داشت.

$$S_e = C_R C_D C_T C_L C_\sigma C_s C_N S'_e \quad (18)$$

که در آن  $S'_e, S_e$  به ترتیب حد دوام نمونه استاندارد و حد دوام قطعه است.  $C_R, C_D, C_T, C_L, C_\sigma, C_s, C_N$  به ترتیب ضرایب تصحیح قابلیت اطمینان، اندازه، دما، بار، تنش، کیفیت سطح و آخرین ضریب تصحیح مربوط به شیار می باشند. مقدار حد دوام خستگی نمونه آزمایشگاهی برابر  $840$  مگاپاسکال است. با اعمال ضرایب مناسب [۲۲] [۲۸] مقدار حد دوام خستگی قطعه در دماهای  $30^\circ C$  و  $50^\circ C$  به ترتیب برابر  $531$  و  $408$  مگاپاسکال حاصل می شود. در ناحیه عمر نامحدود نمودار به دو بخش تقسیم شده است. در حالت افقی فرض می شود در سطوح تنش کمتر از حد دوام هیچگونه آسیبی به قطعه وارد نمی شود. در حالت دیگر با استفاده از فرضیه هایباخ فاکتور ضریب شیب تغییر یافته است تا اثرات تخریبی تنش های تناوبی کوچک تر از حد دوام در تخمین عمر لحاظ گردد.



شکل ۶: نمودار تنش-عمر نمونه استاندارد و تبدیل شده با روش های پالمگربین-ماینر و هایباخ

که در این عبارت ها تنش ها تک محوری هستند. در بیشتر مواقع در واقعیت یک حالت دومحوره یا سه محوره وجود دارد. بنابراین به روابطی برای بیان ارتباط این تنش ها نیاز است. مدل های خستگی چند محوره به روش تنش-عمر را می توان در چهار دسته بندی بیان نمود:

- دیدگاه فرمول های تجربی<sup>۴</sup>: بهترین معادلات تطبیق داده شده بر روی داده های تجربی خستگی در شرایط آزمون همزمان بارهای کششی و برشی. این روش برای حالت تنش دومحوره یا تنش کاملاً معکوس مناسب است.
- دیدگاه تنش معادل<sup>۵</sup>: این روش بر پایه تئوری های ون-میزز یا ترسکا بنا نهاده شده است.
- دیدگاه صفحه بحرانی<sup>۶</sup>: این دیدگاه تعبیر فیزیکی از فرایند شروع آسیب ارائه می دهد. در صفحات گوناگون و مستعد شروع ترک، صفحه با بیشترین آسیب جهت شناسایی جهت ترک مشخص می شود.
- دیدگاه چند-مقیاسه دانگ وان<sup>۷</sup>: این روش برای آسیب خستگی مزوسکوپیک<sup>۸</sup> در حد خستگی مناسب است.

از بین روش های فوق دیدگاه تنش معادل از مقبولیت بیشتری برخوردار است. یک روش عملی برای برآورد خستگی استفاده از مفهوم انرژی واپیچش است. برای حالت های تک محوره و چند محوره فرض می شود که رفتار سیکلی یک ماده، معادل هنگامی است که ماده بین دو مقدار انرژی واپیچش حرکت می کند. در این پژوهش با استفاده از رابطه ون-میزز بیشینه مقدار تنش متوسط و تناوبی محاسبه شده و با کمک آن ها به بررسی خستگی پرداخته می شود. با استفاده از این مقادیر شرایط شکست برای یک حالت تنشی چند محوره قابل محاسبه است [۲۸].

### منحنی S-N آلیاژ H-13 و ضرایب تصحیح

نمودار استاندارد S-N این آلیاژ تولید شده به روش ESR و عملیات حرارتی شده در حالت  $R=-1$  با استفاده از پژوهش فیلیپ بر روی این آلیاژ استخراج شده است [۲۹]. منحنی تنش-عمر با اعمال ضرایب مناسب با در نظر گرفتن هندسه، نحوه تولید و دمای غلتک نمودار تنش-عمر برای شرایط کاری مدنظر آماده شد که در شکل ۶ نشان داده شده است. استحکام

## تخمین عمر ناشی از تنش‌های ترمومکانیکی

تخمین عمر ناشی از تنش‌های ترمومکانیکی با استفاده از روابط تخمین عمر محدود و تأثیر تنش متوسط بر عمر خستگی بررسی گردید. تاریخچه تنش ترمومکانیکی ایجاد شده در غلتک‌ها جهت شکل‌دهی اسپول به عنوان یک بلوک بارگذاری در نظر گرفته شد. این فرض بدین معنی است که فاصله شکل‌دهی حلقه‌ها به قدر کافی طولانی است که غلتک به دمای کاری مدنظر برسد. آسیب ناشی از هر بارگذاری در یک دور چرخش غلتک و هر بلوک شکل‌دهی، توسط قانون پالمگرن- ماینر (PM) و پالمگرن- ماینر تغییر یافته مدل هایباخ (MPM.Haibach) بررسی شد. اثر بلوک‌های پی‌درپی بارگذاری بر عمر قطعه و اثر ترتیب و اندازه بارها توسط روش مانسون- هالفورد (MH) بررسی گردید.

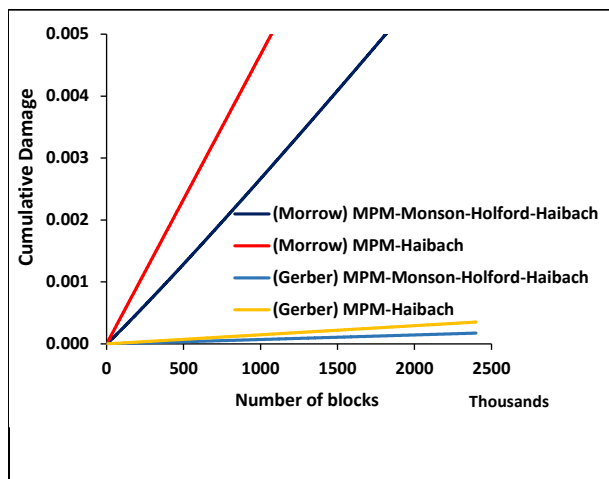
زمانی که جمع آسیب‌ها ناشی از بلوک‌های پی‌درپی و شکل‌دهی تعدادی حلقه با توجه به آلیاژ به 0.3 رسید پیش‌بینی می‌شود که قطعه دچار خرابی می‌گردد [۲۲]. ضریب ایمنی خستگی با توجه به دستورالعمل‌های ساخت و طراحی و تجربه کارشناسان در این حوزه به صورت تجربی برابر ۱/۵ در نظر گرفته شد.

آسیب ناشی از بارگذاری بر روی غلتک اصلی در هر بلوک در دمای  $30^{\circ}\text{C}$  با استفاده از روش‌های گودمن و گربر در فاصله نرمال ۰/۹۹ زیر سطح غلتک اصلی محاسبه گردید. غلتک اصلی برای شکل دادن حلقه موردنظر در هر بلوک بارگذاری 24 می‌چرخد و آسیب در هر سیکل بارگذاری (یک دور چرخش) و یک بلوک در جدول ۱ نشان داده شده است. در این جدول روش انجام محاسبات برای دو روش مارو و گربر به عنوان نمونه نمایش داده شده است. با توجه به نتایج این جدول مشخص است که روش مارو تنش کاملاً معکوس معادل بزرگ‌تری را نسبت به روش گربر محاسبه می‌کند. از این رو آسیب پیش‌بینی شده در روش مارو بزرگ‌تر از آسیب در روش گربر است.

جهت محاسبه آسیب از منحنی S-N از سه روش استفاده گردید. در روش اول از منحنی معمولی S-N و روش پالمگرن- ماینر (PM) استفاده شد. در این روش اثرات تخریبی تنش‌های کوچک‌تر از حد دوام صفر در نظر گرفته می‌شود. در روش دوم منحنی S-N با فرضیات هایباخ تغییر کرده است. با رابطه پالمگرن- ماینر تغییر یافته (MPM-H) اثرات تخریبی تنش‌های کوچک‌تر از حد دوام و آسیب در عمرهای بالای  $10^6$  مشخص می‌شود. در روش سوم از ترکیب مدل هایباخ و مانسون- هالفورد (MPM-H-MH) استفاده گردید. در این روش ترکیبی مدل

تغییر یافته هایباخ جهت تأثیر تنش‌های کوچک‌تر از حد دوام و روش مانسون- هالفورد به منظور تأثیر اندازه و ترتیب بارگذاری استفاده شد. با این کار اثر تنش‌های سیکلی کوچک‌تر از حد دوام در نظر گرفته خواهد شد. این تنش‌ها به‌وفور در تاریخچه بارگذاری غلتک‌ها در زمان سرویس‌دهی یافت می‌شود. با توجه به جدول ۱ مشخص است که روش پالمگرن ماینر هیچ‌گونه آسیبی را در غلتک محاسبه نمی‌کند به کمک دو روش دیگر نیز آسیب کمی در هر بلوک ایجاد می‌گردد. آسیب ایجاد شده بر حسب بلوک‌های بارگذاری غلتک اصلی با دمای  $30^{\circ}\text{C}$  با استفاده از دیدگاه‌های مارو و گربر و روش‌های آسیب تجمعی هایباخ و ترکیبی در شکل ۷ نشان داده شده است.

در روش هایباخ بر خلاف روش پالمگرن ماینر اثرات تنش‌های کوچک در نظر گرفته شده و عمر کاهش یافته است. در روش ترکیبی هایباخ- مانسون- هالفورد در بلوک‌های ابتدایی آسیب کمتری پیش‌بینی می‌شود در صورتی که محاسبه ادامه پیدا کند، با افزایش تعداد بلوک‌های بارگذاری این تفاوت کاهش یافته و تا جایی ادامه پیدا می‌کند که آسیب بیشتری در تعداد بلوک مشابه پیش‌بینی می‌شود. به دلیل اینکه تعداد بلوک‌ها در محدوده عمر نامحدود قرار دارد ادامه نمودار در این شکل نشان داده نشده است. در روش ترکیبی فرض می‌شود که ماده در بارگذاری‌های ابتدایی آسیب کمتری می‌بیند ولی با افزایش ترک‌های میکروسکوپی استحکام آن کاهش یافته و سرعت ایجاد آسیب در آن بیشتر می‌شود. با توجه به اینکه روش گربر دامنه تنش معادل کوچک‌تری را نسبت به روش مارو در نظر می‌گیرد، آسیب‌های وارده به غلتک اصلی در هر بارگذاری کوچک‌تر است.

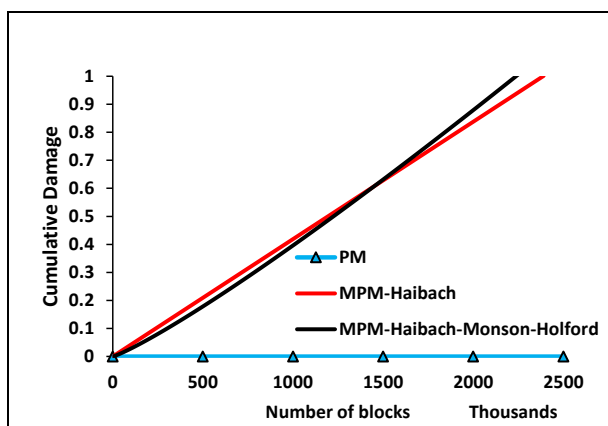


شکل ۷: آسیب ایجاد شده بر حسب تعداد بلوک در غلتک اصلی با دمای

$30^{\circ}\text{C}$

جدول ۱: دامنه تنش کاملاً معکوس معادل و آسیب ایجاد شده در غلتک اصلی با دمای  $30^{\circ}C$  توسط قانون پالمگرن-مایر، قانون اصلاح شده هایباخ و روش ترکیبی هایباخ-مانسون-هالفورد

ردیف	مارو				گربر			
	$S_{ar}(MPa)$	$D_{PM}$	$D_{MPM-H}$	$D_{MPM-H-MH}$	$S_{ar}(MPa)$	$D_{PM}$	$D_{MPM-H}$	$D_{MPM-H-MH}$
1	327.8	0	5.0565E-14	5.06E-14	284.7	0	5.18E-15	5.18E-15
2	366.4	0	4.16072E-13	5.06E-14	314.9	0	3.52E-14	5.18E-15
3	383.7	0	9.3817E-13	5.06E-14	328.0	0	7.13E-14	5.18E-15
4	405.8	0	2.55681E-12	5.06E-14	344.7	0	1.72E-13	5.18E-15
5	406.7	0	2.40951E-12	5.06E-14	344.7	0	1.54E-13	5.18E-15
6	429.1	0	6.23813E-12	5.06E-14	361.7	0	3.55E-13	5.18E-15
7	429.5	0	5.88421E-12	5.06E-14	361.4	0	3.23E-13	5.18E-15
8	431.6	0	6.09098E-12	5.06E-14	362.7	0	3.24E-13	5.18E-15
9	428.5	0	5.02643E-12	5.06E-14	360.0	0	2.64E-13	5.18E-15
10	431.4	0	5.47008E-12	5.06E-14	361.9	0	2.79E-13	5.18E-15
11	435.2	0	6.20941E-12	5.06E-14	364.6	0	3.08E-13	5.18E-15
12	443.5	0	8.6758E-12	5.06E-14	370.9	0	4.12E-13	5.18E-15
13	447.1	0	9.85211E-12	5.06E-14	373.5	0	4.57E-13	5.18E-15
14	459.2	0	1.60672E-11	5.06E-14	382.8	0	7.11E-13	5.18E-15
15	472.6	0	2.74424E-11	5.06E-14	393.1	0	1.15E-12	5.18E-15
16	481.6	0	3.86442E-11	5.06E-14	399.9	0	1.57E-12	5.18E-15
17	485.7	0	4.46373E-11	5.06E-14	403.0	0	1.78E-12	5.18E-15
18	495.0	0	6.33586E-11	5.06E-14	410.1	0	2.45E-12	5.18E-15
19	500.5	0	7.71542E-11	5.06E-14	414.3	0	2.92E-12	5.18E-15
20	514.4	0	1.29483E-10	5.06E-14	425.1	0	4.69E-12	5.18E-15
21	533.8	0	2.60517E-10	5.06E-14	440.1	0	8.95E-12	5.18E-15
22	561.8	0	6.85976E-10	8.66E-14	461.9	0	2.19E-11	6.14E-15
23	582.1	0	1.3395E-09	5.45E-11	477.7	0	4.07E-11	1.32E-12
24	593.7	0	1.92828E-09	1.98E-09	486.7	0	5.7E-11	5.83E-11
آسیب در بلوک اول		0	4.67E-09	2.04E-09		0	1.47E-10	5.98E-11



شکل ۸: پیش‌بینی تعداد بلوک قابل تحمل غلتک اصلی با استفاده از

دیدگاه گربر (دمای  $500^{\circ}C$ )

تعداد بلوک قابل تحمل غلتک اصلی در دمای  $500^{\circ}C$  توسط دیدگاه گربر و مقایسه سه روش آسیب تجمعی در شکل ۸ نشان داده شده است. همانند بررسی قبل، در این حالت نیز روش پالمگرن-مایر به دلیل در نظر نگرفتن اثرات تنش‌های کوچک‌تر از حد دوام، عمر بی‌نهایت برای قطعه پیش‌بینی می‌کند. در روش هایباخ با در نظر گرفتن اثرات تخریبی دامنه تنش‌های کوچک‌تر از حد دوام، آسیب انباشته با افزایش بلوک‌های بارگذاری بیشتر می‌شود. در روش ترکیبی به دلیل فرض کاهش استحکام در طی زمان کارکرد، شیب نمودار به مرور افزایش یافته و سریع‌تر به آسیب ۱۰۰٪ می‌رسد. با توجه به این شکل مشخص است که روش هایباخ و ترکیبی هایباخ-

شکست خستگی، عمرهای طولانی جهت غلتک اصلی با دمای اولیه  $30^{\circ}\text{C}$  تخمین زده می‌شود.

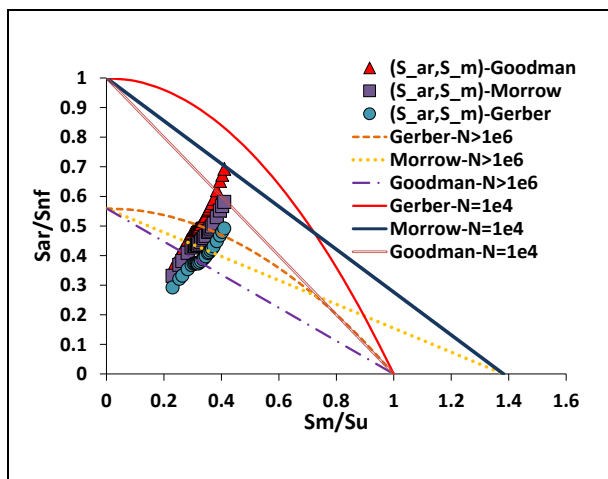
آسیب ناشی از بارگذاری در یک بلوک در زیر سطح غلتک اصلی به روش‌های گودمن، مارو و گربر و با استفاده از روش پالمگرن- ماینر صفر است. با استفاده از روش پیشنهادی هایباخ این مقادیر به ترتیب برابر  $8-2/83e$ ،  $9-4/67e$  و  $10-1/47e$  است. این مقادیر با استفاده از روش ترکیبی هایباخ-مانسون-هالفورد در اولین بلوک به ترتیب برابر  $8-1/27e$ ،  $9-2/04e$  و  $11-5/98e$  حاصل می‌شود. همان‌طور که انتظار می‌رود بیشترین آسیب توسط روش گودمن و کمترین آن با روش گربر تخمین زده شده است.

در شکل ۱۰ تاریخچه بارگذاری غلتک اصلی در دمای  $500^{\circ}\text{C}$  و منحنی‌های شکست خستگی با دیدگاه‌های مختلف نشان داده شده است. با توجه به شکل مشخص است که دامنه تنش نسبت به حالت قبل کمی کاهش و از سوی دیگر تنش متوسط کمی افزایش یافته است. آسیب ناشی از بارگذاری در یک بلوک در زیر سطح غلتک اصلی به روش‌های گودمن، مارو و گربر و با استفاده از روش پالمگرن-ماینر به ترتیب برابر  $5-2/29e$ ،  $6-2/87e$  و صفر حاصل می‌گردد. با استفاده از روش پیشنهادی هایباخ این مقادیر به ترتیب برابر  $5-2/80e$ ،  $6-5/60e$  و  $7-4/19e$  حاصل می‌شود. این مقادیر با استفاده از روش ترکیبی هایباخ-مانسون-هالفورد در اولین بلوک به ترتیب برابر  $6-8/37e$ ،  $7-1/56e$  و  $7-2/12e$  حاصل می‌شود. در صورتی که آسیب در سطح غلتک بررسی شود، آسیب در هر بلوک با استفاده از روش‌های گودمن، مارو و گربر در دمای  $30^{\circ}\text{C}$  با استفاده از روش پالمگرن-ماینر تغییر یافته به ترتیب برابر

مانسون-هالفورد در طول عمرهای زیاد تقریباً نتایج یکسانی را ارائه می‌دهند.

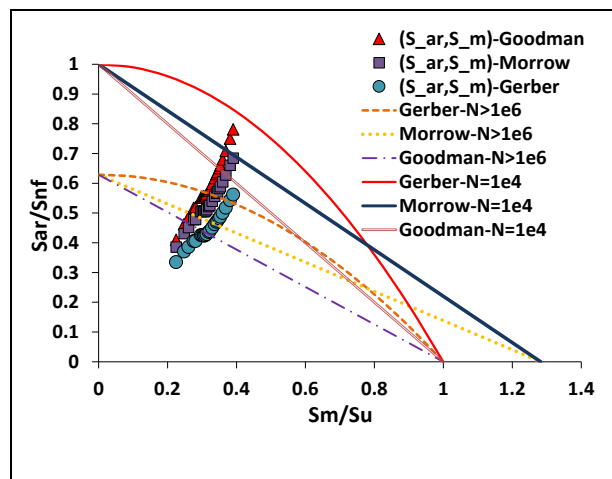
همان‌طور که قبلاً اشاره گردید، با توجه به کاستی‌هایی که در روش‌های خطی وجود دارد هایباخ [۲۲] بر اساس نتایج تجربی حداکثر آسیب تجمعی قابل تحمل فولادها را برابر  $0/3$  پیشنهاد داده است. لذا فرض می‌شود در روابط تجمع آسیب خطی وقتی آسیب انباشته در قطعه به  $0/3$  رسید قطعه خراب می‌شود. اما در مدل ترکیبی هایباخ-مانسون-هالفورد عمر تا زمان رسیدن آسیب به مقدار ۱ محاسبه می‌شود. با استفاده از این فرض روش هایباخ مقدار عمر کمتری را پیش‌بینی خواهد نمود.

در شکل ۹ تاریخچه بارگذاری غلتک اصلی در دمای  $30^{\circ}\text{C}$  و منحنی‌های شکست خستگی با دیدگاه‌های مختلف نشان داده شده است. در این شکل خطوط عمر محدود و نامحدود بر اساس دیدگاه‌های گودمن، مارو و گربر ترسیم شده و با توجه به تنش‌های ایجاد شده در غلتک، مکان هندسی دامنه تنش معادل و متوسط بر روی آن تعیین شده است. مکان هندسی نقاط نشان می‌دهد که مقدار تنش کاملاً معکوس معادل توسط روش گودمن بزرگ‌تر محاسبه می‌شود. با بررسی تاریخچه بارگذاری غلتک اصلی و معیار گودمن مشخص می‌شود که بیشتر تاریخچه بارگذاری در داخل محدوده عمر یک میلیون سیکل قرار دارد و تنها تعدادی از نقاط بارگذاری در این حالت خارج از ناحیه ۱۰۰۰ سیکل قرار گرفته است. این عوامل سبب می‌گردد که میزان عمر پیشنهادی به این روش نسبت به روش‌های دیگر کوچک‌تر باشد. تعیین نقاط بارگذاری با روش مارو و گربر نشان می‌دهد که همه نقاط در ناحیه عمر نامحدود قرار گرفته است. با توجه به مکان هندسی این نقاط در منحنی



شکل ۱۰: منحنی‌های شکست خستگی و مکان هندسی تاریخچه

بارگذاری غلتک اصلی با دمای اولیه  $500^{\circ}\text{C}$



شکل ۹: منحنی‌های شکست خستگی و مکان هندسی تاریخچه

بارگذاری غلتک اصلی با دمای اولیه  $30^{\circ}\text{C}$

جدول ۲: پیش‌بینی عمر خستگی ترمومکانیکی غلتک اصلی

دمای ۳۰ °C	پالمگرن-مایر (D=0.3)		پالمگرن-مایر تغییر یافته هایباخ (D=0.3)		پالمگرن-مایر تغییر یافته هایباخ-مانسون- هالفورد (D=1)	
	تعداد بلوک	آسیب بلوک اول	تعداد بلوک	آسیب بلوک اول	تعداد بلوک	آسیب بلوک اول
گودمن	∞	0	>1E7	2.83E-8	>1E7	1.27E-08
مارو	∞	0	>1E7	4.67088E-09	>1E7	2.04E-9
گربر	∞	0	>1E7	1.47087E-10	>1E7	5.98E-11
دمای ۵۰۰ °C	پالمگرن-مایر (D=0.3)		پالمگرن-مایر تغییر یافته هایباخ (D=0.3)		پالمگرن-مایر تغییر یافته هایباخ-مانسون- هالفورد (D=1)	
	تعداد بلوک	آسیب بلوک اول	تعداد بلوک	آسیب بلوک اول	تعداد بلوک	آسیب بلوک اول
گودمن	13116	2.2872E-05	10727	2.7966E-05	31907	8.37E-06
مارو	104697	2.87E-06	53600	5.597E-06	155950	2.12E-06
گربر	∞	0	716468	4.1872E-07	2034810	1.56E-07

در مندرل با توجه به نفوذ حرارت بیشتر به داخل آن و سطح تماس بیشتر با حلقه، ماکزیم تنش ون-میزز معادل در سطح آن اتفاق می‌افتد. همچنین یکنواختی تقریبی تنش‌های ایجاد شده در لایه مرزی حرارتی (افزایش تنش مکانیکی در زیر سطح و تنش حرارتی در روی سطح سبب افزایش تنش هیدرواستاتیک در این لایه می‌شود) منجر به کوچک‌تر شدن تنش‌های معادل در مندرل شده است لذا عمر پیش‌بینی شده را تحت تأثیر قرار خواهد داد. به دلیل اینکه در مندرل تنش‌های حرارتی عامل مهمی در میزان تنش‌های ترمومکانیکی معادل هستند لذا خنک‌کاری بر روی عمر تأثیر خواهد گذاشت. از سوی دیگر به دلیل سرعت دورانی بیشتر مندرل نسبت به غلتک اصلی سیکل‌های بارگذاری بیشتری را در هر بلوک تجربه خواهد کرد. مندرل برای شکل دادن حلقه مورد نظر در هر بلوک بارگذاری تقریباً ۵۳ دور می‌زند و آسیب در هر سیکل بارگذاری و یک بلوک به شیوه‌ای که در جدول ۱ نشان داده شده است، محاسبه می‌شود.

در شکل ۱۱ تاریخچه بارگذاری مندرل در دمای ۳۰ °C و منحنی‌های شکست خستگی با دیدگاه‌های مختلف نشان داده شده است. با توجه به شکل مشخص است که دامنه تنش معادل نسبت به غلتک اصلی کاهش محسوس و از سوی دیگر تنش متوسط کمی افزایش یافته است. در ضمن تغییرات دامنه تنش معادل در طی یک بلوک بارگذاری نسبت به غلتک اصلی کاهش یافته است. این امر سبب می‌گردد تا عمر مندرل نسبت به غلتک اصلی افزایش یابد. در شکل ۱۲ تاریخچه بارگذاری مندرل در دمای ۵۰۰ °C و منحنی‌های شکست خستگی با دیدگاه‌های مختلف نشان داده شده است. با توجه به شکل مشخص است

۱۳-۶/۳۰e، ۱۳-۲/۱۹e و ۱۴-۱/۶۹e می‌شود. در دمای ۵۰۰ °C این آسیب‌ها به ترتیب برابر ۶-۳/۳۰e، ۸-۱/۱۶e و ۹-۴/۲۲e می‌باشد. این مقادیر نشان می‌دهد که آسیب ناشی از تنش‌های ترمومکانیکی در سطح غلتک اصلی کمتر از سطوح داخلی آن می‌باشد. خلاصه نتایج حاصل از تخمین عمر غلتک اصلی در جدول ۲ نشان داده شده است.

از آنجایی که در هر بلوک بارگذاری تعداد زیادی از تنش‌های کاملاً معکوس معادل زیر حد خستگی قرار دارند لذا روش‌های پالمگرن-مایر اصلاح شده مناسب‌تر هستند. با استفاده از این روش‌ها اثرات تخریبی تنش‌های کوچک بر عمر در نظر گرفته می‌شود. در صورتی که آسیب ۱۰۰٪ با روش‌های هایباخ و هایباخ-مانسون-هالفورد بررسی شود هر دوی آن‌ها تقریباً تعداد بلوک یکسانی را پیش‌بینی می‌کنند. با توجه به مباحث مطرح شده و داده‌های جدول در صورتی که دمای اولیه غلتک اصلی ۳۰ °C و خنک‌کاری بر روی آن صورت گیرد کاهش عمر به سبب تنش‌های ترمومکانیکی تقریباً ناچیز است ولی در صورتی که جهت جلوگیری از پدیده سرد شدن ناگهانی<sup>۹</sup> حلقه دمای اولیه غلتک اصلی ۵۰۰ °C در نظر گرفته شود تعداد بلوک بارگذاری غلتک به ۷۰۰۰۰۰ کاهش خواهد یافت.

با توجه به آسیب وارده در هر بلوک بارگذاری مشخص است که عمر المان‌های زیر سطح به مراتب از المان‌های سطحی کمتر است. این امر باعث ایجاد ترک در زیر سطح می‌گردد که با بارگذاری مداوم به سمت سطح غلتک حرکت می‌کند. این اتفاق باعث می‌شود تا خرابی ناشی از تنش‌های ترمومکانیکی در غلتک اصلی به یک‌باره اتفاق بیفتد.

جدول ۳: پیش‌بینی عمر خستگی ترمومکانیکی مندرل

دمای ۳۰ °C	پالمگرن-ماینر (D=0.3)		پالمگرن-ماینر تغییر یافته هایباخ (D=0.3)		پالمگرن-ماینر تغییر یافته هایباخ-مانسون- هالفورد (D=1)	
	آسیب بلوک اول	تعداد بلوک	آسیب بلوک اول	تعداد بلوک	آسیب بلوک اول	تعداد بلوک
گودمن	0	∞	1.34E-10	>1E7	3.67E-11	>1E7
مارو	0	∞	1.77E-11	>1E7	4.67E-12	>1E7
گربر	0	∞	1.27E-13	>1E7	1.13E-13	>1E7
دمای ۵۰۰ °C	پالمگرن-ماینر (D=0.3)		پالمگرن-ماینر تغییر یافته هایباخ (D=0.3)		پالمگرن-ماینر تغییر یافته هایباخ-مانسون- هالفورد (D=1)	
	آسیب بلوک اول	تعداد بلوک	آسیب بلوک اول	تعداد بلوک	آسیب بلوک اول	تعداد بلوک
گودمن	5.66E-06	53003.61	1.52229E-05	19707	3.66E-06	4968600
مارو	0	∞	1.23473E-07	2429680	1.97E-08	7054509
گربر	0	∞	6.34015E-10	>1E7	1.79E-10	>1E7

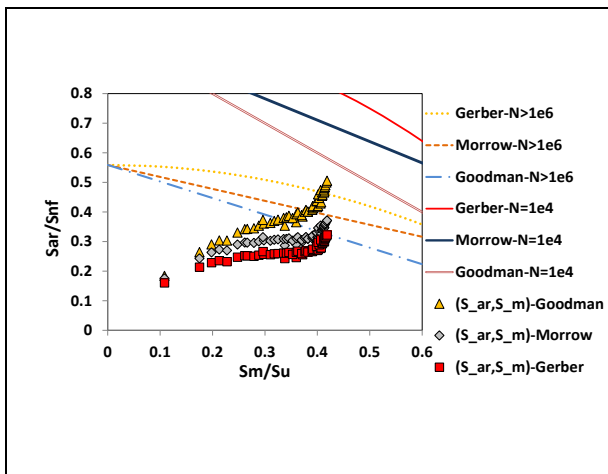
خنک‌کاری مناسب بر عمر مندرل تأثیر بسزایی دارد و با خنک‌کاری مناسب و جلوگیری از افزایش دمای غیر همگن عمر آن افزایش خواهد یافت. لذا با توجه به نتایج به دست آمده توسط شبیه‌سازی‌های مختلف و تخمین عمر خستگی در مندرل مشخص است که بیشترین عمر مندرل زمانی حاصل می‌شود که تغییرات شدید دمایی در آن به وجود نیامده و افزایش دمای مندرل در حین کارکرد کم باشد.

در تخمین تنش‌های ترمومکانیکی در این پژوهش به دلیل شکل‌دهی آلیاژ تیتانیوم در دمای بالا و تنش تسلیم کم آن، مقدار نیروی کمی به مندرل وارد می‌شود. در صورتی که مندرل به صورت سه‌بعدی شبیه‌سازی گردد بیشترین تنش مکانیکی در دو انتهای غلتک ایجاد می‌گردد. این مکان به دلیل اینکه در تماس با حلقه نیست، در زمان‌های کوتاه هیچ‌گونه تنش حرارتی

که روش گودمن محتاطانه‌ترین پیش‌بینی را برای دامنه تنش معادل دارد. با استفاده از این روش در مندرل تعدادی از بارگذاری‌ها بر روی مندرل در طی یک بلوک بارگذاری در خارج از عمر نامحدود قرار می‌گیرد. دو روش دیگر کلیه تاریخچه بارگذاری در منطقه عمر نامحدود قرار دارد.

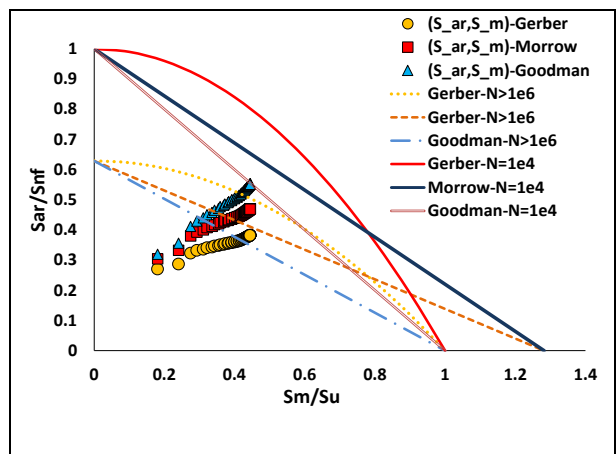
آسیب ناشی از بارگذاری بر روی مندرل در هر بلوک شکل‌دهی در دمای ۳۰ °C و ۵۰۰ °C در سطح آن با استفاده از روش پالمگرن-ماینر، پالمگرن-ماینر تغییر یافته (هایباخ) و روش ترکیبی هایباخ-مانسون-هالفورد در جدول ۳ مشخص شده است.

با مقایسه جداول ۲ و ۳ مشخص است که علیرغم سیکل‌های بارگذاری بیشتر بر روی مندرل نسبت به غلتک اصلی، عمر بیشتری برای آن پیش‌بینی می‌شود. همچنین در مندرل تأثیر



شکل ۱۲: منحنی‌های شکست خستگی و مکان هندسی تاریخچه

بارگذاری مندرل با دمای اولیه ۵۰۰ °C



شکل ۱۱: منحنی‌های شکست خستگی و مکان هندسی تاریخچه

بارگذاری مندرل با دمای اولیه ۳۰ °C

جدول ۴: پیش‌بینی عمر خستگی ترمومکانیکی در مندرل با در نظر گرفتن خمش

دمای ۳۰ °C	پالمگرن-مایر (D=0.3)		پالمگرن-مایر تغییر یافته هایباخ (D=0.3)		پالمگرن-مایر تغییر یافته هایباخ-مانسون-هالفورد (D=1)	
	تعداد بلوک	آسیب بلوک اول	تعداد بلوک	آسیب بلوک اول	تعداد بلوک	آسیب بلوک اول
گودمن	∞	0	229100	1.3095E-06	727732	5.9091E-07
مارو	∞	0	5762481	5.2061E-08	>1E7	2.2681E-08
گربر	∞	0	>1E7	4.9329E-11	>1E7	3.1657E-11
دمای ۵۰۰ °C	پالمگرن-مایر (D=0.3)		پالمگرن-مایر تغییر یافته هایباخ (D=0.3)		پالمگرن-مایر تغییر یافته هایباخ-مانسون-هالفورد (D=1)	
	تعداد بلوک	آسیب بلوک اول	تعداد بلوک	آسیب بلوک اول	تعداد بلوک	آسیب بلوک اول
گودمن	∞	≈0	863	0.0003473	2675	1.24E-04
مارو	∞	≈0	8010	3.745E-05	49722	1.3155E-05
گربر	∞	≈0	196879	1.523E-06	444742	1.1028E-06

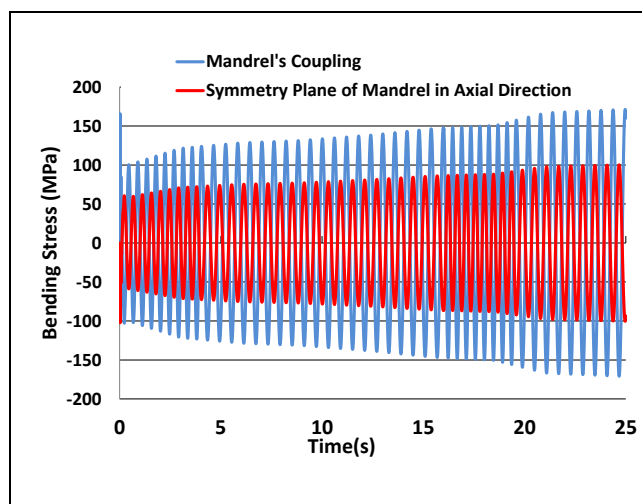
محل اتصال آن در شکل ۱۳ نشان داده شده است. با توجه به این شکل مشخص است که بیشترین تنش ایجاد شده در محل اتصال مندرل به سازه نگهدارنده در حدود ۱۷۰ مگاپاسکال است و تنش ایجاد شده در مرکز مندرل تقریباً ۴۰٪ کوچک‌تر از دو انتهای آن است.

نتایج حاصل از تخمین عمر مندرل با در نظر گرفتن خمش در جدول ۴ نشان داده شده است. با توجه به این جدول مشخص است که علیرغم در نظر گرفتن تنش ایجاد شده بزرگ‌تر در مندرل به دلیل جمع تنش‌ها، مقدار عمر نامحدود برای مندرل حاصل شده است. البته در دمای ۵۰۰ °C و بالطبع کاهش استحکام مندرل، عمر آن کاهش قابل ملاحظه‌ای خواهد داشت. با توجه به عمر تخمین زده شده مشخص است که با اعمال تنش ناشی از خمش در مندرل نیز عمر بالایی برای مندرل پیش‌بینی می‌شود. در صورتی که آلیاژ با استحکام تسلیم بالاتر و یا میزان تغذیه مندرل (درصد کاهش ضخامت) افزایش یابد، عمر مندرل شدیداً تحت تأثیر خمش قرار می‌گیرد.

### نتیجه‌گیری

در نورد گرم فلزات، دستگاه‌ها در معرض آسیب‌های گوناگونی قرار می‌گیرند که تنش ترمومکانیکی یکی از این عوامل است. در این پژوهش تأثیر این تنش‌ها بر روی عمر و پیش‌بینی مکان خرابی در غلتک‌های دستگاه نورد حلقه بررسی شده است. روش تنش-عمر و سه روش آسیب تجمعی برای محاسبه عمر استفاده گردید. نتایج نشان می‌دهد غلتک اصلی تحت تأثیر تنش‌های مکانیکی است و ماکزیمم تنش معادل در زیر سطح و نسبت

در آن وجود نمی‌آید لذا عمر آن وابسته به تنش خمشی است. در مرکز غلتک تنش ایجاد شده ناشی از خمش کوچک‌تر از دو انتهای آن است. البته مقدار این تنش بر روی تنش‌های ترمومکانیکی اثر خواهد گذاشت. جهت اعمال اثر تنش خمشی بر مندرل دامنه تنش کاملاً معکوس خمشی با دامنه تنش معادل ون- میزز جمع شده است. مقدار تنش حاصل در طراحی محافظه‌کارانه‌تر است در صورت اعمال هم‌زمان تنش‌ها بر مندرل به دلیل افزایش تنش هیدرواستاتیک و کاهش تنش انحرافی، مقدار تنش معادل کاهش خواهد یافت. این حالت شبیه وضعیتی است که بارهای مکانیکی و حرارتی هم‌زمان بر مندرل اعمال می‌شود. مقدار تنش ترمومکانیکی ون میزز ایجاد شده در مندرل از تنش معادل حرارتی به هنگامی که بارهای حرارتی به تنهایی بر آن وارد می‌شوند، کوچک‌تر است. تاریخچه تنش ایجاد شده در مندرل به دلیل خمش در مرکز غلتک و



شکل ۱۳: تاریخچه تنش ناشی از خمش در مندرل



- [5] C. Du, Q. Pan, S. Chen and S. Tian, "Effect of rolling on the microstructure and mechanical properties of 6061-T6 DS-FSW plate," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 772, 2020.
- [6] C. Xu, T. Wu, H. Yang, H. Wu and N. Kwok, "Study on vibration mechanism induced by skidding in pure rolling contact," *Tribology International*, vol. 154, 2021.
- [7] H. Sayadi and S. Serajzadeh, "Prediction of thermal responses in continuous hot strip rolling processes," *Production Engineering*, vol. 9, no. 1, pp. 79-86, 2015.
- [8] D. Benasciutti, F. De Bona and M. G. Munteanu, "A harmonic one-dimensional element for non-linear thermo-mechanical analysis of axisymmetric structures under asymmetric loads: The case of hot strip rolling," *Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, vol. 51, no. 7, pp. 518-531, 2016.

[9] ع. مرآتی، ع. نگهبان برون و ا. براتی، "بررسی شبیه سازی دوبعدی نورد حلقه داغ و تأثیر پارامترهای مختلف بر روی فرایند شکل دهی اسپول موتور"، *نشریه علمی- پژوهشی مهندسی هوانوردی*، سال ۱۸، شماره ۱، صفحات ۷۵-۹۲، ۱۳۹۵

- [10] F. Qayyum, M. Shah, S. Manzoor and M. Abbas, "Comparison of thermomechanical stresses produced in work rolls during hot and cold rolling of Cartridge Brass 1101," *Materials Science and Technology*, vol. 31, no. 3, pp. 317-324, 2015.
- [11] B. Koohbor, "Finite element modeling of thermal and mechanical stresses in work-rolls of warm strip rolling process," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, vol. 230, no. 6, pp. 1076-1086, 2016.
- [12] A. Escolán, J. Bielsa, H.-G. B., M. Jiménez, J. López and R. Allende, "Thermo-mechanical fatigue approach to predict tooling life in high temperature metal forming processes," *International Journal of Material Forming*, vol. 10, no. 4, pp. 535-545, 2017.
- [13] A. Negahban, E. Barati and A. Maracy, "Evaluation of Thermo-mechanical stress in work rolls of ring rolling mill under thermal and mechanical loading," *Journal of Computational Applied Mechanics*, vol. 49, no. 2, pp. 323-334, 2018.

[14] ع. نگهبان، ا. براتی، ع. مرآتی و ن. وحدت آزاد، "تأثیر دمای اولیه و خنک کاری بر تنش ترمومکانیکی غلتک‌های نورد حلقه"، *نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر* سال ۵۲، شماره ۱، صفحات ۲۱-۳۰، ۱۳۹۸

فاصله نرمال ۰/۹۹ اتفاق می‌افتد. خرابی و شروع ترک ناشی از تنش‌های ترمومکانیکی در غلتک اصلی از زیر سطح شروع می‌شود. مندرل تحت تاثیر تنش‌های حرارتی است زیرا سطح تماس مندرل با حلقه داغ نسبت به غلتک اصلی بزرگتر است، تنش‌های حرارتی در سطح مندرل، سهم قابل ملاحظه در تنش‌های ترمومکانیکی ایفا می‌کنند. محل ماکزیمم تنش معادل در مندرل بر روی سطح و فاصله نرمال رخ می‌دهد. این وضعیت در غلتک‌های نورد ورق نیز مشاهده می‌شود. با مقایسه نتایج پژوهش با خرابی غلتک‌ها در نورد ورق مشخص می‌شود خرابی غلتک اصلی در نورد حلقه گرم، شبیه خرابی غلتک‌های نورد سرد ورق است و از زیر سطح شروع می‌شود. از این رو خرابی در این غلتک ناگهانی خواهد بود. در نقطه مقابل خرابی در مندرل همانند غلتک‌های نورد گرم ورق از روی سطح شروع شروع شده و با بازرسی منظم قابل ردیابی و ترمیم است.

#### پی‌نوشت‌ها

- ۱ ASTM
- ۲ Modified Palmgren-Miner (Haibach)
- ۳ Manson-Holford
- ۴ Empirical formula approach
- ۵ Equivalent stress approach
- ۶ The critical plane approach
- ۷ Dong van multiscale approach
- ۸ Mesoscopic
- ۹ Chilling effect

#### مراجع

- [1] B. Hill, "Damage mechanism life assessment of high temperature component," *2nd, ASM International*, 1989.
- [2] ا. استیون، ع. فاطمی، راستیونز و ه. اوتن، *خستگی فلزات در مهندسی*، ترجمه ا. موسوی، تهران: ویرایش دوم، پژوهشگاه نیرو، ۱۳۸۹.
- [3] j. Shigley, c. Mischke and r. Budynas, "Mechanical engineering design", 2004.
- [4] S. H. Zhang, W. H. Tian and L. Deng, "A novel yield criterion and its application to calculate the rolling force of a thick plate during hot rolling," *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, vol. 43, no. (2021). . , (1), 1-11., pp. 1-11, 2021.

- Guide line," pp. 57-69, 2003.
- [23] E. Haibach, " Modified linear damage accumulation hypothesis for consideration of the fatigue loss with progressive damage," Laboratory for operational strength., 1970.
- [24] L. YL., P. J., H. R. and B. M., Fatigue testing and analysis: theory and practice, Butterworth-Heinemann, 2005.
- [25] M. S., F. J. and E. C.e., " Application of a double linear damage rule to cumulative fatigue," *InFatigue Crack Propagation-ASTM Internationa*, Jan 1967.
- [26] A. Negahban, E. Barati and A. Maracy, "Evaluation of thermo-mechanical stress in work rolls of ring rolling mill under thermal and mechanical loading," *Journal of Computational Applied Mechanics*, vol. 49, no. 2, pp. 323-334, 2018.
- [27] N. Dowling, C. Calhoun and A. Arcari, "Mean stress effects in stress- life fatigue and the Walker equation," *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, vol. 32, no. 3, pp. 163-179, 2009.
- [28] Y. Lee, M. Barkey and H. Kang, Metal fatigue analysis handbook: practical problem-solving techniques for computer-aided engineering, Elsevier, 2011.
- [29] T. Philip, "ESH: a means of improving transverse mechanical properties in tool and die steels," *Metals Technology*, vol. 2, no. 1, pp. 554-564, 1975.
- [30] J. Benedyk, high performance alloys database(H-13), 2008.
- [15] K. Hu, F. Zhu, J. Chen, N. Noda, W. Han and Y. Sano, "Simulation of Thermal Stress and Fatigue Life Prediction of High Speed Steel Work Roll during Hot Rolling Considering the Initial Residual Stress," *Metals*, vol. 9, no. 9, p. 966, 2019.
- [16] F. Weidlich, A. P. V. Braga, d. Silva, L. G. D. B., M. B. Júnior and R. M. & Souza, "The influence of rolling mill process parameters on roll thermal fatigue," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 102, no. 5, pp. 2159-2171, 2019.
- [17] P. Palit, S. N. Patel, J. Mathur and S. & Shenoy, "Analysis of a Progressive Failure of a Work Roll in Hot Strip Mill," *Journal of Failure Analysis and Prevention*, vol. 19, no. 5, pp. 1297-1303, 2019.
- [18] M. Tolcha, H. Altenbach and G. Tibba, "Modeling creep-fatigue interaction damage and H13 tool steel material response for rolling die under hot milling," *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 223, p. 106770, 2020.
- [19] B. Hadizadeh, A. Bahrami, A. Eslami, K. Abdian, M. Y. Araghi and M. Etezazi, "Establishing the cause of failure in continuous casting rolls," *Engineering Failure Analysis*, vol. 108, 2020.
- [20] M. H. R. Eslami, J. Ignaczak, N. Noda, N. Sumi and Y. Tanigawa, Theory of Elasticity and Thermal Stresses: Explanations, Problems and Solutions (Solid Mechanics and Its Applications, vol. 197), Dordrecht: Springer, 2013.
- [21] A. Fatemi and L. Yang, "Cumulative fatigue damage and life prediction theories: a survey of the state of the art for homogeneous materials," *International journal of fatigue*, vol. 20, no. 1, pp. 9-34, 1998.
- [22] T. Haihach, "Analytical Strength Assessment of components in Mechanical Engineering. FKM-