

## مروری بر تحلیل خستگی میل لنگ

محمد امید خشوعی<sup>۱</sup>، علی عبداللهی فر<sup>۲</sup>، سید مسعود هاشمی<sup>۳</sup>

۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، شیراز

۲ علی عبداللهی فر، استادیار، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، شیراز، [abdollahifar@shirazu.ac.ir](mailto:abdollahifar@shirazu.ac.ir)

۳ سید مسعود هاشمی، استادیار، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، شیراز

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۳/۰۹

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۷/۰۲

### چکیده

میل لنگ از جمله قطعات مهم و پیچیده در انواع موتور است. اهمیت تجزیه و تحلیل خستگی و تخمین عمر آن نیز بر کسی پوشیده نیست. برای طراحی میل لنگ چالش‌های بسیاری از جمله بار مفید خودرو، وزن کمتر درخواستی، بازده و عمر دوام بیشتر مورد نظر است. میل لنگ طی عمر کارکرد خود متحمل بارهای خمشی و پیچشی متناوب می‌شود و شکست در آن سبب ایجاد خسارت جدی به موتور می‌گردد، بنابراین در زمان طراحی باید استحکام خستگی آن لحاظ شود. در این مقاله، مروری جامع بر پژوهش‌های متنوع انجام شده در حوزه‌های مکانیک شکست، تحلیل خستگی و تخمین عمر میل لنگ مطرح شده است. برای این منظور، نخست روش‌های آزمایشگاهی، تحلیلی و عددی محاسبه شاخص‌های خستگی و تخمین عمر میل لنگ بیان می‌شود، سپس روش‌های تشخیص و ارزیابی مکان و اندازه ترک ارائه می‌گردد. در نهایت به بررسی روش‌های عملی افزایش عملکرد خستگی و بهینه‌سازی این قطعه پرداخته می‌شود.

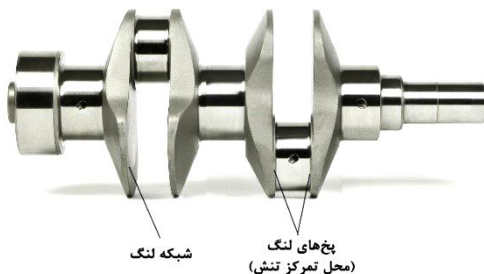
**واژگان کلیدی:** میل لنگ، خستگی، عمر، تشخیص ترک، بهینه‌سازی

### ۱. مقدمه

می‌گیرد، اما بار برشی وارد شده در مقابل دو بار دیگر قابل چشم‌پوشی است. از طرفی تغییرات هندسه در میل لنگ سبب تمرکز تنش در نقاط پلکانی (مکان اتصال یاتاقان به شبکه لنگ) که در شکل ۱ مشخص شده است، می‌شود. بنابراین، مناطق پلکانی مکان‌هایی با تنش بحرانی‌اند و نقش تعیین‌کننده‌ای در عمر خستگی قطعه ایفا می‌کنند. در یک موتور درونسوز، دو نیرو بر میل لنگ وارد می‌شود. عامل اصلی بارگذاری در موتور، نیرویی است که بر اثر احتراق در محفظه احتراق به پیستون وارد

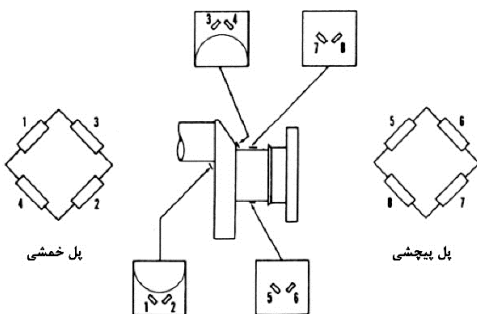
میل لنگ از جمله بزرگترین و مهمترین و پیچیده‌ترین اجزای موتورهای درونسوز است که هندسه‌ای متشکل از استوانه‌هایی به‌عنوان یاتاقان و صفحاتی به‌عنوان شبکه لنگ دارد. اندازه یک میل لنگ به تعداد سیلندر و توان خروجی موتور بستگی دارد و می‌تواند از ۳/۲ کیلوگرم برای یک موتور تک‌سیلندر با خروجی محدود ۱۲ اسب بخار، تا ۳۰۰ تن برای یک موتور دیزل چهارده سیلندر با توان خروجی ۱۰۸۹۲۰ اسب بخار متغیر باشد. این قطعه طی عمر خود تحت بارهای برشی، پیچشی و خمشی قرار

یکی از نیازهای ضروری است. در یک آزمون به منظور بررسی نقاط بحرانی، برای اندازه‌گیری بار خمشی و پیچشی وارده بر هر بخش از میل‌لنگ، کرنش‌سنج‌هایی در محل‌های مشخص به صورت پل وتسون بسته می‌شوند [۱].



شکل ۱. نقاط پلکانی پخ (مکان اتصال یاتاقان به شبکه لنگ)

مکان کرنش‌سنج‌ها باید به نحوی انتخاب شود که لزوماً با اعمال بار تغییرات طول دو کرنش‌سنج مقابل با یکدیگر در پل، برابر باشد. سپس ولتاژ معینی به ورودی پل وارد و ولتاژ دو سر دیگر (خروجی) پل اندازه‌گیری می‌شود. تا زمانی که بار به میل‌لنگ وارد نشده است، ولتاژ خروجی صفر است (طبق قاعده وتسون)، اما وقتی بار به میل‌لنگ وارد می‌شود، مقدار ولتاژ خروجی تغییر می‌کند. تغییر ولتاژ متناسب با تغییر کرنش و در پی آن تغییر تنش است. لذا با اندازه‌گیری تغییر ولتاژ میزان کرنش و تنش و حتی بار وارد شده قابل تعیین است (شکل ۲). این عملیات را جنسن روی یک میل‌لنگ هشت سیلندر خورجینی انجام داده است [۲].



شکل ۲. مکان کرنش‌سنج روی میل‌لنگ و پل وتسون ایجاد شده

برای تعیین تنش پیچشی و خمشی در مطالعه جنسن [۲]

نتایج آزمایشگاهی و تحلیلی نشان داده است که برای جلوگیری از شکست زودرس در شبکه لنگ در طول مناطق ناپیوستگی، باید به دقت ماشینکاری و سنگ‌زنی انجام شود.

می‌شود و از طریق یک حرکت رفت‌وبرگشتی به یاتاقان‌ها انتقال می‌یابد. نیروی دیگر وارد شده به میل‌لنگ به ماهیت دینامیکی سازوکار مربوط می‌شود. چون موتور در سرعت‌های بالا کار می‌کند، نیروهای گریز از مرکز در قسمت‌های دوار مانند شاتون‌ها به وجود می‌آیند. این نیروها بارهای پیچشی و خمشی بر میل‌لنگ وارد می‌کنند که در صورت عدم کنترل سبب ایجاد روند شکست در قطعه می‌شوند. اساساً عوامل شکست یا آسیب در یاتاقان‌ها به سه دسته طبقه‌بندی می‌شوند:

۱. عواملی چون عدم وجود روغن در کارتر، روانکاری ناقص یاتاقان‌ها، درجه حرارت بالای روغن عامل و استفاده نادرست از موتور (بیش از دور مجاز)

۲. عوامل مکانیکی مثل نامیزانی میل‌لنگ در نصب و راه‌اندازی، یاتاقان‌های نامناسب (اندازه اشتباه)، کنترل نکردن مقدار

لقی بین محور میل‌لنگ و یاتاقان و ارتعاشات میل‌لنگ  
۳. عوامل ناشی از تعمیر مانند نامیزانی یاتاقان‌ها (به علت سنگ‌زنی نامناسب)، نامیزانی میل‌لنگ (به دلیل تنظیم نادرست میل‌لنگ)، تمرکز تنش بالا (به علت سنگ‌زنی نامناسب در شعاع هر دو طرف یاتاقان‌ها) و زبری سطح بالا (به علت سنگ‌زنی نامناسب، و یا ناشی از خوردگی).

بنابراین بررسی شکست و کنترل آن برای افزایش طول عمر میل‌لنگ در طراحی این قطعه ضروری است. بر این اساس بررسی‌ها و مطالعاتی روی رفتار میل‌لنگ تحت بارهای استاتیکی و دینامیکی انجام و روش‌های گوناگون تجربی و عددی برای تحلیل استحکام خستگی و تخمین عمر ارائه شده است.

## ۲. روش‌های بررسی ترک و خستگی میل‌لنگ

### ۲-۱. روش آزمایشگاهی

خستگی، مهمترین عامل شکست در میل‌لنگ است که به دلیل بارگذاری چرخه‌ای به وجود می‌آید و وجود تمرکز تنش در نقاط پلکانی و تغییر سطح مقطع در آنها خطر شکست خستگی را تقویت می‌کند. آزمون‌های مرسوم که روی ماده اولیه میل‌لنگ انجام می‌شود، شامل آزمون کششی یکنواخت، آزمون خستگی با کرنش کنترل‌شده، آزمون ضربه چارپی شکاف وی. شکل ۱ و آزمون خستگی قطعه با بار کنترل‌شده می‌باشد. از طرفی، بارهای ناشی از احتراق، شرایط بارگذاری چندمحوری روی میل‌لنگ ایجاد می‌کنند، لذا تعیین بارهای ایجاد شده بر روی میل‌لنگ

همچنین پیشنهاد می‌شود که شعاع پخ افزایش یابد [۳]. در آزمونی دیگر، برای بررسی استحکام خستگی، نمونه‌ای از میل‌لنگ با پخ نوردشده آزمایش می‌شود. این آزمون نشان می‌دهد روش نورد عمیق مناسب می‌تواند استحکام خستگی خمشی را به مقدار قابل توجهی نسبت به میل‌لنگ معمولی که پخ‌های آن نورد نشده است، افزایش دهد [۴]. تأثیر تنش پسماند ناشی از فرایند نورد پخ بر روند خستگی میل‌لنگ چدن نشکن تحت خمش را چین و همکاران (۲۰۰۵) با استفاده از روش مکانیک شکست مطالعه کردند [۵]. آنها فرایند نورد پخ را براساس سایه‌نگاری<sup>۲</sup> از پروفیل‌های سطح پخ، قبل و بعد از فرایند نورد با استفاده از تحلیل اجزای محدود الاستیک پلاستیک بررسی نمودند. روشی که برای بررسی فرایند رشد ترک ناشی از خستگی با توجه به شدت تنش ترک در شروع از سطح پخ استفاده شد، مکانیک شکست خطی الاستیک است.

همان‌طور که گفته شد، ایجاد ترک روی سطح قطعه و رشد آن، از عوامل شکست در قطعه است. خیمنز اسپادافور (۲۰۰۹) شکست میل‌لنگ ژنراتور دیزل ۱۸ سیلندر خورجینی چهارزمانه‌ای را که در کارخانه برق استفاده می‌شود، مطالعه کردند [۶]. میل‌لنگ در سرعت ۱۵۰۰ دور در دقیقه راه‌اندازی شد و قبل از شکست به مدت ۲۰۰۰۰ ساعت کار کرده بود. شکست میل‌لنگ در طول لنگ بین یاتاقان و یاتاقان‌گرد دوم مشاهده شد. علامت‌گذاری روی میل‌لنگ نشان داد که شکست خستگی در طول یک منطقه نازک و سخت که در سطح و نشان‌دهنده شروع ترک است، تولید می‌شود. اینفانته و همکاران (۲۰۱۳) در کار خود دلائل شکست میل‌لنگ موتور هواپیما را بررسی کردند [۷]. پژوهش آنها در مورد شکست یاتاقان متحرک با توجه به خستگی بود. برای تجزیه و تحلیل شروع ترک و انتشار ترک در سطح شکست، فناوری میکروسکوپ نوری و الکترونیکی مورد استفاده قرار گرفت. فانته و همکاران (۲۰۱۳) شکست فاجعه‌بار میل‌لنگ یک وسیله نقلیه موتوری را تجزیه و تحلیل کردند [۸]. میل‌لنگ از یک تشنج مکانیکی در یاتاقان‌گرد پس از ۳ سال کار آسیب دیده بود. این آسیب ترمیم شد و پس از ۳۰۰۰۰ کیلومتر وسیله نقلیه با یک شکست فاجعه‌بار در همان یاتاقان‌گرد، دوباره آسیب دید. سنجش تصویری که از یاتاقان‌گرد گرفته شد نشان داد که دو ترک خستگی در حال رشد به طرف مرکز یاتاقان‌گرد است، همان منطقه‌ای که در آنجا شکست

نهایی رخ داده بود. برش عمودی ترک نیز اثر خمش متناوب را تأیید کرد. عمر استقامت میل‌لنگ موتور علاوه بر خواص مواد و پارامترهای شکل، ارتباط نزدیکی به استحکام خستگی آن دارد. علاوه بر این نورد عمیق به‌عنوان یک روش اصلی سختکاری سطح، حد خستگی را با اعمال تنش فشاری پسماند در شعاع منطقه پخ، افزایش می‌دهد. هدف از مطالعه کورایشی (۲۰۱۳) نیز این بود که عمر خستگی موتور، از طریق بهینه‌سازی طراحی میل‌لنگ با تعیین استحکام خستگی فولاد میکروآلیاژی در مقابل فولاد آلیاژی کروم-مولیبدن، حداکثر شود و اثر بار نورد عمیق و هندسه پخ‌های نوردشده بررسی گردد [۹]. آزمون‌های خستگی روی نمونه‌های خمشی دوار استاندارد برای میل‌لنگ‌های واقعی انجام شد تا نشان دهد چگونه استحکام خستگی با نمونه‌های مختلف ارتباط دارد. همچنین ارتباط توزیع تنش با گشتاور خمشی با استفاده از روش اندازه‌گیری کرنش نمونه میل‌لنگ اثبات شد. بنابراین، تجزیه و تحلیل را می‌توان از ترکیب تنش‌ها با توجه به اثر تنش پسماند استاتیکی به‌علاوه اعمال تنش خمشی دینامیکی انجام داد و شرایط بهینه برای بار نورد، هندسه پخ و مواد را مشخص کرد.

## ۲-۲. روش تحلیلی

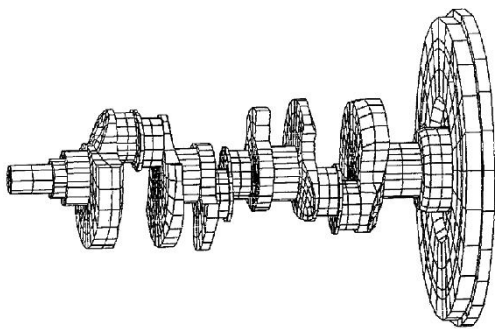
گلیگور بیجوک و همکاران (۲۰۰۱) به تعدادی از مزایای استفاده از چدن کروی در کاربردهای میل‌لنگ اشاره کردند [۱۰]. به گفته آنها، چدن کروی ترکیبی از ویژگی‌های مطلوب مواد انعطاف‌پذیر، از جمله فولاد، با مزایایی، مانند ماشینکاری آسان، انعطاف‌پذیری طراحی (به‌عنوان مثال انتخاب آزاد شکل قطعه و در نتیجه توانایی یکپارچه‌سازی توابع مختلف در یک بخش)، دقت بالای ابعاد ریخته‌گری خام و کاهش هزینه حاصل از ماشینکاری نهایی را داراست. آنها مشخص کردند که چدن کروی ظرفیت میرایی بالاتر و حساسیت به فاق پایین‌تری دارد. با این‌حال، در این اظهارات ممکن است خواص خستگی نامناسب چدن کروی نسبت به فولادها و نقش قابل توجه خلل و فرج و عیوب ریخته‌گری در کاهش استحکام خستگی میل‌لنگ را نادیده گرفته شود. شکست میل‌لنگ از شکست در یاتاقان‌ها شروع می‌شود و آغاز شکست با توجه به عمل مالش بین یاتاقان و یاتاقان‌گرد و با توجه به بار محوری بر روی محور است [۱۱]. زیارونگ (۲۰۰۹) تمرکز تنش در تجزیه و تحلیل

مدل استاتیکی میل‌لنگ را بررسی کرد [۱۲]. تمرکز تنش به‌طور عمده در قسمت باریک‌شدگی<sup>۳</sup> تغییر سطح مقطع محور رخ می‌دهد و تنش ناشی از پخ‌های یاتاقان‌گرد نیز نسبتاً بزرگ است [۱۳]. پاتیل و همکاران (۲۰۱۳) استحکام خستگی میل‌لنگ در صنعت خودرو را در شرایط بارگذاری زیاد، وزن کمتر، بهره‌وری بالاتر و چرخه‌های کوتاه‌تر بار ارزیابی کردند [۱۴].

### ۲-۳. روش عددی

از روش‌های حل عددی برای تجزیه و تحلیل قطعه‌ای مانند میل‌لنگ به‌دلیل داشتن هندسه پیچیده و برآورد عمر خستگی استفاده می‌شود [۱۵]. هنری و همکاران (۱۹۹۲) یک روش اجزای محدود برای ارزیابی دوام میل‌لنگ معرفی کردند [۱۶]. با توجه به اینکه نیروهای ناشی از احتراق گاز و لختی منجر به ایجاد بارهای شعاعی خارجی می‌گردد، آنها از یک روش آماری مشخص برای محاسبه واکنش یاتاقان‌ها با توجه به لقی آنها نسبت به بلوک موتور استفاده کردند و در نهایت با استفاده از نتایج، گشتاورهای دینامیکی پیش‌بینی در هر لنگ و در طول چرخه میل‌لنگ را به دست آوردند. مورلتاس (۱۹۹۵) از یک مدل شبیه‌سازی شده میل‌لنگ برای بررسی و تحلیل مشکل لرزش مربوط به چرخ‌طیار استفاده کرد [۱۷]. این مدل خاصیت ژيروسکوپی از چرخ‌طیار، خم میل‌لنگ و حفره‌های نادرست بلوک، و ناهمسانگردی انعطاف‌پذیری بلوک برای یک میل‌لنگ دوار را در نظر می‌گیرد و همچنین می‌تواند سابقه تنش دینامیکی روی میل‌لنگ در تمام طول چرخه موتور را محاسبه کند و برای این کار نیاز به شبکه‌بندی اجزای محدود از کل میل‌لنگ مونتاژ شده دارد که این شبکه‌بندی در شکل ۳ نمایش داده شده است. او در این مدل تجزیه و تحلیل ساختاری میل‌لنگ، پاسخ دینامیکی براساس روش اجزای محدود را پیش‌بینی می‌کند. گوندلاک و همکاران (۱۹۹۸) حساسیت به فاق آهن نشکن سخت‌گردانی حرارتی شده<sup>۴</sup> را با استفاده از روش اجزای محدود، طی دو مرحله اصلی برای محاسبه رفتار تنش گذرای میل‌لنگ، بررسی کردند. نخستین قدم محاسبه تغییر شکل وابسته به زمان با انتگرال‌گیری گام به گام و دوم، تغییر شکل‌های گذرا در یک مدل عنصر جامد از میل‌لنگ به‌منظور تعیین رفتار تنش وابسته به زمان بود. به‌منظور تجزیه و تحلیل تنش و خستگی میل‌لنگ و تحلیل تنش قسمت

یاتاقان‌گرد، معمولاً از روش‌های عددی و برای مدل کردن میل‌لنگ و تجزیه و تحلیل بار از نرم‌افزارهای شبیه‌سازی (انسیس<sup>۵</sup>، پرواینجینیر<sup>۶</sup> و جز این‌ها) استفاده می‌شود [۱۹]. کار اصلی، مدل کردن میل‌لنگ و سپس شبیه‌سازی آن برای تجزیه و تحلیل تنش و خستگی است [۲۰-۲۱]. این موضوع به‌دلیل درخواست بار مفید بیشتر، وزن کمتر، بازده بالاتر و چرخه‌های کوتاه‌تر بار در میل‌لنگ انتخاب شده است. هدف از مدلسازی و تجزیه و تحلیل میل‌لنگ، شناسایی اثر تنش‌ها در میل‌لنگ، برای مقایسه مواد مختلف و ارائه راه‌حل ممکن است [۲۲]. تجزیه و تحلیل تنش در یاتاقان‌گرد، حداکثر تغییر شکل و نقطه حداکثر تنش را مشخص می‌کند [۲۳-۲۴]. همچنین نتایج حاصل از تجزیه و تحلیل تنش در نقاط بحرانی، می‌تواند در بهینه‌سازی میل‌لنگ چدنی مورد استفاده قرار گیرد و این امر مستلزم این است که تنش از مقدار دامنه تنش مجاز در میل‌لنگ عبور نکند [۱۹].

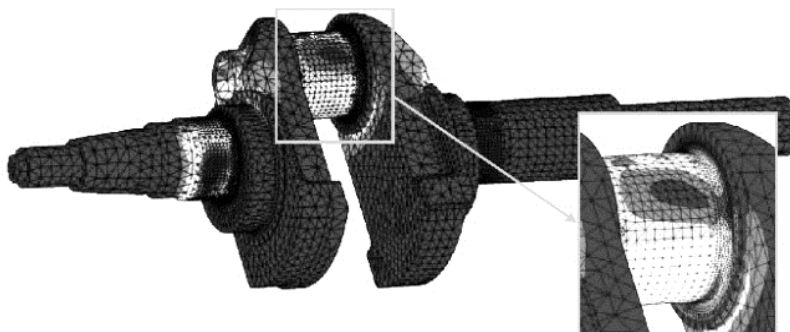


شکل ۳. شبکه‌بندی برای مجموعه میل‌لنگ و چرخ‌طیار

برای استفاده از روش اجزای محدود در مطالعه مورلتاس [۱۷]

چین و همکاران (۲۰۰۵) شکست ناشی از خستگی میل‌لنگ چدنی را در منطقه‌ای که در آن خمش رخ می‌دهد، بررسی کردند [۵]. در این مطالعه دو تجزیه و تحلیل مختلف انجام شد: الف) منطقه‌ای که تحت خمش است بدون در نظر گرفتن تنش پسماند و با در نظر گرفتن اجزای محدود دوبعدی الاستیک، تجزیه و تحلیل می‌شود؛ ب) توزیع تنش پسماند در امتداد مناطق پخ، با استفاده از تجزیه و تحلیل اجزای محدود دوبعدی الاستیک - پلاستیک انجام می‌شود. هر دو تجزیه و تحلیل نشان می‌دهد که ترک خستگی ممکن است در تنش پسماند مناطق پخ تولید شود. شبیه به این کار را چوی و پان (۲۰۰۹) برای توزیع تنش پسماند و تنش خمشی در طول فرایند نورد پخ

و برای آزمون خستگی ارائه کردند [۲۵]. مطالعه آنها نشان داد که تمرکز تنش به‌طور عمده در قسمت‌های پخ محور رخ می‌دهد و تنش قسمت‌های پخ یاتاقان‌گرد نیز نسبتاً بزرگ است. این نتایج نشان می‌دهد منطقه‌ای که در آن تنش زیاد است به‌راحتی شکسته می‌شود و به‌طور عمده این مناطق در مفصل بازوی لنگ و یاتاقان ثابت، و بازوی میل‌لنگ و یاتاقان متحرک، متمرکز است [۲۶-۲۸]. منتظرصدق و فاطمی (۲۰۰۷) نیز میل‌لنگ فولاد آهنگری شده و میل‌لنگ چدنی یک موتور



شکل ۴. تنش اجزای محدود میل‌لنگ فولاد آهنگری شده با بزرگنمایی پخ یاتاقان‌گرد در مطالعه منتظرصدق و فاطمی [۲۹-۳۰]

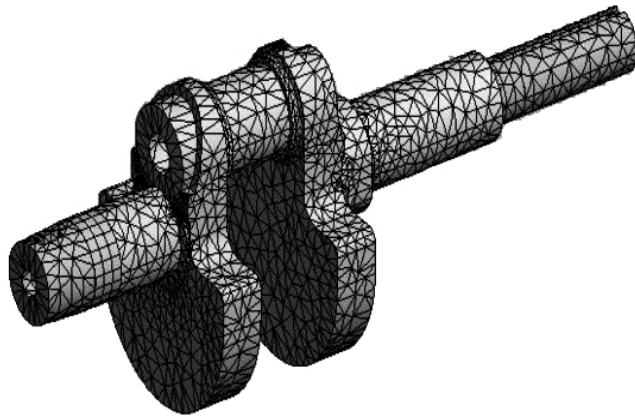
تک‌سیلندر چهارزمانه را برای بررسی انتخاب کردند [۲۹-۳۰]. با استفاده از یک دستگاه اندازه‌گیری مختصات<sup>۷</sup> عددگذاری تجزیه و تحلیل بار روی هر دو میل‌لنگ انجام شد و نتایج توسط مدل نرم‌افزار آدامز<sup>۸</sup> موتور مطابق شکل ۴ تأیید گردید. با توجه به بار پیچشی وارده بر میل‌لنگ در شرایط بارگذاری دینامیکی، تغییری در تنش فون میزز<sup>۹</sup> در محل تنش بحرانی ایجاد نشد. تنش تجربی و نتایج اجزای محدود به‌دست آمده از بررسی، توافق نزدیکی با ۷ درصد اختلاف نشان دادند.

شبان‌بانگ لی و همکاران (۲۰۰۷) بر روی اثر وجود ترک اریب در یاتاقان‌گرد میل‌لنگ و مدلی برای تجزیه و تحلیل ارتعاش میل‌لنگ کار کردند [۳۱]. روش مورد استفاده در این مطالعه شامل مدل اجزای محدود میل‌لنگ با ترک اریب در یاتاقان‌گرد و رابطه‌ای برای تیر و معادله غیرخطی حرکت آن است. آنها اثر عمق ترک در پاسخ‌گذا و داده‌های عددی برای شبیه‌سازی حرکت میل‌لنگ ترک خورده را بررسی کردند. منتظرصدق و همکاران (۲۰۰۸) در مطالعه‌ای شبیه‌سازی دینامیکی میل‌لنگ فولاد آهنگری‌شده یک موتور تک‌سیلندر چهارزمانه را بررسی کردند و برای به‌دست آوردن مقدار تنش موجود در مناطق بحرانی، تجزیه و تحلیل به روش اجزای محدود روی آن انجام دادند [۳۲]. تجزیه و تحلیل دینامیکی منجر به توسعه طیف بار وارده بر بلبرینگ یاتاقان‌گرد گردید و این بار و شرایط مرزی با توجه به نوع نصب موتور، روی مدل اجزای محدود به‌کار گرفته شد. سیمون‌هو و همکاران (۲۰۰۹) کار خود را بر بهینه‌سازی فرایند نورد پخ میل‌لنگ انجام دادند [۳۳]. با توجه به اینکه از فرایند نورد پخ برای بهبود عمر خستگی میل‌لنگ استفاده می‌شود، از روش تحلیلی برای بهینه‌سازی فرایند نورد پخ و در

نتیجه برای افزایش دوام آن استفاده کردند و تحلیل تنش را به کمک روش اجزای محدود غیرخطی و محاسبات برای فرایند نورد را بر اساس عامل شدت تنش مدل متا<sup>۱۰</sup> انجام دادند [۳۳]. آنها از روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو<sup>۱۱</sup> و روش جستجوی الگوی مستقیم هوک - جیوز<sup>۱۲</sup> نیز برای طراحی بهینه و دوام میل‌لنگ استفاده کردند. گوانگ‌مینگ و ژنگ‌فنگ (۲۰۰۹) مطالعه‌ای روی سختی پیچشی میل‌لنگ موتور انجام دادند [۳۴]. آنها سختی پیچشی بازوهای لنگ با ضخامت و عرض‌های مختلف را با استفاده از رابطه کر ویلسون<sup>۱۳</sup> و رابطه کارتر<sup>۱۴</sup> اصلاح‌شده محاسبه و سپس فرکانس ارتعاش پیچشی ذاتی لنگ و بخش آزاد میل‌لنگ را با روش اجزای محدود تعیین کردند. با توجه به مکانیک مواد و رابطه تجربی، محاسبات تئوری سختی پیچشی میل‌لنگ برای ضخامت و عرض متفاوت پیشنهاد شد. تحلیل مودال<sup>۱۵</sup> آزاد میل‌لنگ می‌تواند ۱ تا ۶ جهت فرکانس‌های طبیعی را مشخص کند و مقادیری از فرکانس‌های طبیعی، که احتمال تشدید میل‌لنگ در آن وجود دارد، مناسب نیستند [۱۳]. از تئوری خسارت تجمع خستگی<sup>۱۶</sup> برای تخمین عمر خستگی و ارزیابی عمر باقیمانده میل‌لنگ براساس وضعیت سابقه کارکرد<sup>۱۷</sup> آن،

استفاده می‌شود و با توجه به نتایج تحلیل اجزای محدود با نرم‌افزار انسیس عملکرد دینامیکی و منطقه دارای تنش زیاد مشخص می‌شود. لینگ و همکاران (۲۰۱۰) از طریق چرخه جریان باران، تعداد تنش و طیف بار خستگی بخش‌های کلیدی را به دست آوردند و در نهایت مشخص کردند که یاتاقان ثابت میل‌لنگ در نزدیکی سمت خروجی قدرت و یاتاقان متحرک تنش نسبتاً بالایی دارند [۳۵]. زایوپینگ و همکاران (۲۰۱۰) مدل خودکار حل را که ادغام ضریب پارامترهای هندسی، ضریب تجزیه و تحلیل اجزای محدود و ضریب محاسبه عددی بود، آماده کردند [۳۶]. این مدل براساس بهینه‌سازی طراحی مشترک چندرشته‌ای<sup>۱۸</sup>، در ترکیب با تجزیه و تحلیل اجزای محدود، پارامترهای ساختار متغیر طراحی و طراحی آزمایشی استوار بود. سپس ماتریس نمونه براساس روش نمونه‌گیری مکعب لاتین<sup>۱۹</sup> برای تجزیه و تحلیل پارامترهای ساختاری کلیدی در استحکام خستگی میل‌لنگ تهیه شد. نتایج نشان می‌دهد که شعاع پخ میل‌لنگ دارای بیشترین و شعاع لنگ کمترین تأثیر را در

استحکام میل‌لنگ دارند. بالاموروگان (۲۰۱۱) به کمک یک مدل‌سازی رایانه‌ای و تجزیه و تحلیل بهینه‌سازی میل‌لنگ، عملکرد خستگی دو جنس مورد استفاده در تولید میل‌لنگ خودرو؛ یعنی فولاد آهنگری شده و چدن نشکن را بررسی و با یکدیگر مقایسه کرد [۳۷]. وی در این مطالعه شبیه‌سازی دینامیکی و تجزیه و تحلیل اجزای محدود را برای به دست آوردن تنوع مقدار تنش در نقاط بحرانی دو میل‌لنگ چدنی و فولاد آهنگری شده از یک موتور تک‌سیلندر چهارزمانه مشابه، انجام داد. شبکه‌بندی میل‌لنگ در تحلیل نرم‌افزار انسیس در شکل ۱ نمایش داده شده است. گونگ‌ژی و همکاران (۲۰۱۱) در مطالعه خود استحکام دینامیکی میل‌لنگ موتور دیزل دریایی را تجزیه و تحلیل کردند [۳۸]. بررسی ویژگی‌های دینامیکی میل‌لنگ دریایی با استفاده از روش ترکیب چندسازه‌ای دینامیکی نرم‌افزار ای. وی. ال. اکسایت<sup>۲۰</sup> و تحلیل نرم‌افزار انسیس با روش اجزای محدود، نشان داد که تحت شرایط عملیاتی عادی، حداکثر تنش میل‌لنگ در پخ یاتاقان رخ می‌دهد.

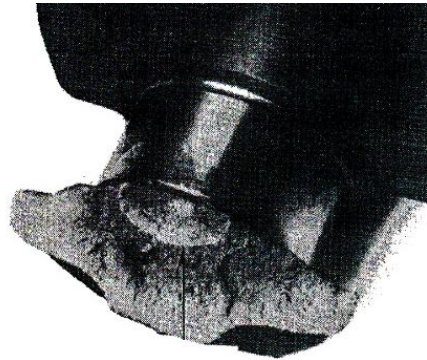


شکل ۱. شبکه‌بندی روی میل‌لنگ چدنی با استفاده از نرم‌افزار انسیس در مطالعه بالاموروگان و همکاران [۳۷]

ورون (۲۰۱۴) میل‌لنگ یک موتور دیزل تک‌سیلندر چهارزمانه را به صورت سه‌بعدی با استفاده از نرم‌افزار سالیدورکز<sup>۲۱</sup> شبیه‌سازی کرد و برای به دست آوردن مقدار تنش در نقاط بحرانی، با استفاده از نرم‌افزار انسیس روی آن تجزیه و تحلیل انجام داد [۳۹]. وی تغییرات تنش روی چرخه موتور و اثر بار پیچشی و خمشی را بررسی و تنش فون میزز را با استفاده از تئوری و نرم‌افزار انسیس محاسبه کرد و در نهایت رابطه بین فرکانس ارتعاش مودال هارمونیک و مودال میل‌لنگ را نیز با استفاده از نرم‌افزار انسیس توضیح داد.

**۳. روش‌های تشخیص مکان و اندازه ترک در میل‌لنگ**  
یکی از شکست‌های معمول در میل‌لنگ‌ها، ترک مکانیکی در نقاط پلکانی تغییر سطح مقطع است. از معیارهای مختلفی در شناسایی ترک در این مناطق استفاده می‌شود. باکستر (۱۹۹۳) یکی از این روش‌های تشخیص ترک را معرفی کرد [۴۰]. او تشخیص ترک را با استفاده از یک نسخه اصلاح‌شده روش الکتروژل<sup>۲۲</sup> مطالعه و نتیجه را به صورت اطلاعات کیفی توسط یک تصویر مستقیم از محل‌های خستگی و کمی به صورت

میزان شارژ جریان به سطح، مشخص نمود (شکل ۲). این روش می‌تواند ترک خستگی و محل‌های آسیب شدید خستگی را نیز مشخص کند [۴۰].



شکل ۲. تصویر نمونه آزمایش پس از شکست در پخ در مطالعه باکستر ترک در طول گوشه پخ ۲/۲ سانتی‌متر امتداد یافته [۴۰]

به دلیل وجود شکاف به وجود آمده است مربوط شود. فانت و فریتاس (۲۰۰۸) دریافتند که دلیل شکست میل‌لنگ خارجی است و می‌تواند از وجود ترک و نقص سطحی نتیجه گرفته شود و همچنین ارتعاشات پیچشی تنش را در میل‌لنگ افزایش می‌دهد [۴۶]. همچنین ترک‌ها با توجه به اثر بار خستگی مکانیکی و حرارتی تولید می‌شوند [۴۷]. پسرا و همکاران (۲۰۱۱) در پژوهش خود به‌طور عمده بر تشخیص ترک‌ها در میل‌لنگ‌های بزرگ به‌منظور اجتناب از خرابی و افزایش دوام خستگی متمرکز شدند [۴۸-۴۹]. حداکثر تغییر شکل میل‌لنگ به‌طور عمده تغییر شکل خمشی در فرکانس پایین و بین یاتاقان ثابت، یاتاقان‌گرد و شبکه لنگ است. بنابراین ترک خمشی مستعد است که در این منطقه نمایان شود. حداکثر تغییر شکل در پایین شبکه لنگ و حداکثر تنش در شعاع انتقال شبکه لنگ و یاتاقان متحرک خود را نشان می‌دهد [۲۳].

#### ۴. بهینه‌سازی میل‌لنگ

در تولید میل‌لنگ بسیار مهم است که از بهترین مواد و هندسه استفاده شود. بنابراین در مطالعات بسیاری به بررسی بهینه‌سازی ماده، هندسه، وزن و مسائل دیگر میل‌لنگ پرداخته شده است. انتخاب بهترین ماده برای ساخت میل‌لنگ به حجم تولید وابسته است و این انتخاب اساس بررسی خستگی و کاهش هزینه تولید می‌باشد.

نالچیری و همکاران (۱۹۹۱) در مطالعه خود بررسی کردند که در تولید میل‌لنگ با عملکرد بالا و با حجم بالای ۲۰۰۰۰۰ قطعه در سال، فولاد میکروآلیاژی آهنگری شده و برای تولید کم (زیر ۱۸۰۰۰۰ قطعه در سال)، میل‌لنگ چدن نشکن سخت‌گردانی حرارتی شده، بیشتر مقرون به‌صرفه است. علاوه بر این، استفاده از فرایند عملیات حرارتی برای رفع عیوب میل‌لنگ فولاد میکروآلیاژی، سبب کاهش بیشتر هزینه می‌شود. هافمن و ترونک (۱۹۹۲) بررسی‌های گسترده‌ای درباره امکان کاهش هزینه ساخت میل‌لنگ فولاد آهنگری شده شامل مواد خام و ماشینکاری، انجام داده‌اند. در فرایند تولید میل‌لنگ برای بهبود استحکام خستگی مواد مورد استفاده و خواص ماشینکاری بهتر، از انواع میکروآلیاژ استفاده می‌شود. استفاده از فولاد میکروآلیاژی می‌تواند هزینه نهایی میل‌لنگ را با حذف فرایند عملیات حرارتی و افزایش قابلیت ماشینکاری کاهش دهد [۵۲].

گواگلیانو (۱۹۹۴) به‌صورت تجربی نشان داد که با هندسه‌ای مانند میل‌لنگ، ترک در سطح آزاد سریع‌تر رشد می‌کند [۴۱]. وی دو روش مقایسه را برای بررسی ترک به‌کار گرفت؛ اولین روش شامل مدل سه‌بعدی با مدل کردن ترک بر روی آن از عمق داخلی تا سطح خارجی و روش دوم استفاده از مدل‌های دوبعدی با یک ترک راست و با عمق شکاف واقعی بود که مدل‌های ساده‌تری هستند و به زمان محاسباتی کمتری نیاز دارند. بیشترین ترک در میل‌لنگ در سطح نقاط پلکانی پخ رخ می‌دهد و سپس در طول محیط یاتاقان‌گرد انتشار می‌یابد [۴۲]. بنابراین بررسی ترک و شکست میل‌لنگ از این نقاط شروع و عملیات‌های سختکاری روی این نواحی انجام می‌شود. البته طبق بررسی‌ها ترک مستعد است از اطراف سوراخ‌های روغن شروع شود [۴۳]. سیلوا (۲۰۰۳) ترک موجود در دو میل‌لنگ دیزل باری را بررسی کرد که به دلیل فرایند سنگ‌زنی اشتباه، ترک کوچک ناشی از خستگی به مرکز یاتاقان ادامه پیدا کرده و آسیب در یاتاقان به وجود آمده بود [۴۴]. این ترک‌ها، به‌طور معمول حاد و نامعلوم هستند. وی در این مطالعه حالت‌های مختلف شکست میل‌لنگ را نیز بررسی کرد. یو و همکاران (۲۰۰۴) اثر عمق شکاف در تغییر فرکانس تشدید را بررسی کردند [۴۵]. آنها فرکانس تشدید را از خمش تشدید قبل و بعد از شناسایی شکاف و همچنین افت فرکانس مورد مقایسه، به‌دست آوردند. انتشار ترک در جزء می‌تواند به کاهش فرکانس که

در بحث بهینه‌سازی هندسه میل‌لنگ هدف دستیابی به بهترین هندسه با کمترین حجم، وزن و ضرایب استحکام بالاتر است [۳۰، ۳۲، ۵۳]. بهینه‌سازی وزن؛ یعنی کاهش وزن به مقدار مطلوب که کاهش هزینه را نیز نتیجه می‌دهد [۲۰]. اولین گام در فرایند بهینه‌سازی، کاهش وزن قطعه با توجه به بارگذاری دینامیکی و با توجه به محدوده تنش تحت بارگذاری دینامیکی است که این مقدار تنش نباید بیش از حد تنش مجاز در میل‌لنگ باشد. گزینه‌های ممکن برای بهینه‌سازی و کاهش وزن در حالت تعاملی با امکان‌سنجی تولید و هزینه در نظر گرفته می‌شود [۳۷]. همان‌طور که از فرایند نورد پخ برای بهبود عمر خستگی میل‌لنگ استفاده می‌شود، بهینه‌سازی این فرایند نیز برای بهبود عملکرد میل‌لنگ و استحکام آن بررسی می‌گردد [۹، ۳۳]. سولانکی (۲۰۱۱) ادبیات طراحی میل‌لنگ و بهینه‌سازی، را ارائه و مواد، فرایند تولید، تجزیه و تحلیل شکست، نحوه طراحی و غیره را بررسی کرد [۲۷]. طراحی میل‌لنگ با در نظر گرفتن بارگذاری دینامیکی و اصول بهینه‌سازی (کارایی هزینه و اندازه) می‌تواند به تعیین قطر مطلوب محور که مورد نیاز برای مشخصات خودرو است، منجر شود. استفاده از مواد جدید که ترکیبی بسیار مطلوب از استحکام بالا، چقرمگی<sup>۳۳</sup> خوب، ماشینکاری خوب و هزینه کم است برای تولید میل‌لنگ سبک با حجم بالا مطرح می‌شود. از اینرو در اسکتز و همکاران (۲۰۰۶) مثال‌هایی از طراحی میل‌لنگ سبک‌وزن و مقایسه ماشینکاری و عملکرد خستگی آن را برای چدن نشکن معمولی، چدن نشکن سخت‌گردانی حرارتی شده معمولی، چدن نشکن سخت‌گردانی حرارتی شده ماشینکاری شده<sup>۳۴</sup> و فولاد آهنگری شده ارائه کردند [۵۴].

## ۵. افزایش عمر و استحکام خستگی در میل‌لنگ

استفاده از فرایندهای عملیات حرارتی و ماشینکاری سطوح سبب افزایش سختی سطح قطعه و در نتیجه مقاومت در برابر ترک و شکست می‌شود. در حقیقت استفاده از این فرایندها به‌منظور به‌وجود آوردن یک تنش پسماند فشاری در قطعه است. البته استفاده از این فرایندها زمان تولید را افزایش می‌دهد و باعث بیشتر شدن هزینه تولید می‌شود. معمولاً برای وارد کردن تنش پسماند فشاری در نقاط بحرانی میل‌لنگ، از سختکاری سطحی<sup>۲۵</sup> استفاده می‌شود [۲۲، ۵۵]. پارک و همکاران (۲۰۱۱)

نشان دادند که بدون هیچ‌گونه اصلاحی در ابعاد، عمر خستگی یک میل‌لنگ را می‌توان به‌طور قابل توجهی با استفاده از عملیات‌های سطحی مختلف بهبود داد [۵۶]. نورد قسمت‌های پخ و نیتروژن‌دار کردن از انواع عملیات سطحی است که آنها در مطالعه خود بررسی کردند [۵۷]. این داده‌ها به‌وضوح نشان می‌دهد که پخ‌های نورد شده می‌تواند به طرز چشمگیری عملکرد خستگی میل‌لنگ را افزایش دهد [۳۳، ۵۸]. اگرچه نیروی نورد بیشتر برای القای تنش فشاری بالاتر در سطح پخ‌ها، استحکام خستگی بهتر را نتیجه می‌دهد، اما بار وارده نباید طوری زیاد شود که سبب تغییر شکل پلاستیک در قطعه شود. کامیمورا [۴]، چین و همکاران [۵] و پارک و همکاران [۵۶] با مطالعات خود نشان دادند که القای تنش پسماند فشاری، استحکام خستگی میل‌لنگ را به‌طور قابل توجهی افزایش می‌دهد. براساس این مطالعات، کاربرد تنش فشاری پسماند در منطقه پلکانی تغییر سطح مقطع میل‌لنگ می‌تواند استحکام خستگی را ۴۰ تا ۸۰ درصد افزایش دهد. مقدار این بهبود به خواص مواد، هندسه میل‌لنگ، و نیروی نورد وارده، بستگی دارد. همچنین فرایند بهینه‌سازی شامل تغییرات هندسه سازگار با موتور و نورد پخ‌ها، بدون تغییر در شاتون و بلوک موتور، استحکام خستگی را افزایش و هزینه تولید میل‌لنگ را کاهش می‌دهد [۳۷]. ریگالسکی و همکاران (۲۰۰۲) تأثیر هندسه و سختکاری سطحی در استحکام خستگی را بر میل‌لنگ موتور دو سیلندر ساخته‌شده از چدن مقاومت بالا در یک موتورسیکلت بررسی کردند [۴۲]. آنها برای تجزیه و تحلیل از میل‌لنگ سخت نشده با پخ و میل‌لنگ سخت‌شده و سخت‌نشده بدون پخ استفاده نمودند. نحوه دانه‌بندی در فرایند تولید میل‌لنگ اعم از ریخته‌گری یا آهنگری شده، تأثیر شگرفی در استحکام خستگی دارد. اگر دانه‌بندی به گونه‌ای باشد که درون قالب پر از حفره گردد، استحکام قالب بسیار پایین می‌آید [۵۹]. آزمون خمش تشدید در مطالعه اسپیتتری و همکاران [۶۰-۶۱] نشان داد که تسریع تغییر جهت تشدید، معیار معتبر شکست است. به‌علاوه، استحکام خستگی به‌دست آمده از معیار شکست قطعه به‌طور قابل توجهی بالاتر از استحکام خستگی به‌دست آمده از معیار شکست ترک سطحی است. در شکل ۳ دستگاه مورد استفاده در پژوهش اسپیتتری نمایش داده شده است. برای دستیابی به طراحی مورد نیاز میل‌لنگ، محاسبه استحکام خستگی براساس



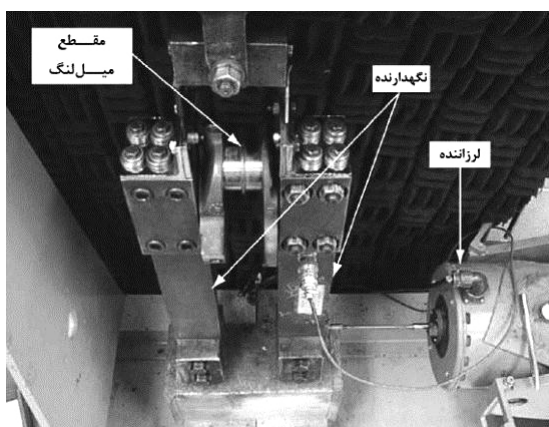
تجزیه و تحلیل تنش از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. همچنین بررسی فرکانس‌های طبیعی میل‌لنگ برای جلوگیری از تشدید از موارد مهم در تحلیل به‌شمار می‌رود. از مقادیر فرکانس‌های طبیعی، آنهایی که احتمال تشدید میل‌لنگ در آن وجود دارد، مناسب نیستند [۱۲].

## ۶. نتیجه‌گیری

میل‌لنگ یکی از بحرانی‌ترین اجزای موتورهای درونسوز است که تحت بارهای خمشی و پیچشی چرخه‌ای در طول عمر کاری خود قرار می‌گیرد. منابع اصلی بارگذاری روی میل‌لنگ، نیروی ناشی از فرایند احتراق گاز و انتقال آن به میل‌لنگ از طریق شاتون و نیروی ناشی از لختی جرم قطعه و متعلقات آن، می‌باشد. پخ‌ها و گوشه‌ها در این قطعه سبب افزایش تنش می‌شوند و این نقاط در طول بارگذاری بالاترین سطح تنش را تحمل می‌کنند. آنها مکان‌های بحرانی هستند که ترک‌ها می‌توانند به‌علت خمش و پیچش چرخه‌ای به‌وجود آیند. میل‌لنگ معمولاً از فولاد آهنگری شده، چدن کروی و چدن نشکن سخت‌گردانی و حرارت داده‌شده تولید می‌شود. در استفاده از فولاد فورج و چدن آلیاژی نرم در میل‌لنگ، به‌طور کلی خواص خستگی فولاد آهنگری شده از چدن بهتر است. از مزایای تولید با عملیات فورج نسبت به ریخته‌گری، تولید قطعه‌ای همگن با تعداد کمی از خلل و فرج و عیوب میکروسکوپی است. همچنین، نتایج خواص جھتی ناشی از فرایند فورج کمک می‌کند تا بالاترین استحکام در جهت جریان دانه‌بندی به‌وجود آید. الگوی جریان دانه‌بندی به‌عنوان یک شاخص کیفیت فورج و استحکام جھتی است. نورد پخ به‌طور سنتی برای اعمال تنش

پسماند فشاری در قسمت‌های پخ و گوشه میل‌لنگ استفاده می‌شود. انجام فرایند نورد پخ در استحکام خستگی بسیار مفید است. استفاده از شرایط بهینه نورد، استحکام خستگی نمونه پخ‌دار را هم‌ارز یا بهتر از نمونه معمولی بهبود می‌بخشد. از عملیات سختکاری سطح برای اعمال تنش پسماند فشاری در نقاط بحرانی میل‌لنگ استفاده می‌شود. در سختکاری اطمینان از وجود تنوع بسیار جزئی در سختی و وجود تنش پسماند فشاری با بزرگی مناسب و توزیع در مناطق انتقال سختی به مواد پایه، چالش به‌حساب می‌آید. به‌دلیل هزینه بالای قطعه و سیستم آزمون و هندسه پیچیده یک قطعه میل‌لنگ با چند یاتاقان، معمولاً از بخشی از میل‌لنگ که شامل یک لنگ با دو یاتاقان هم‌محور می‌باشد برای آزمون خستگی در دستگاه استفاده می‌شود. با توجه به اهمیت نسبی کمتر بار پیچشی در مقایسه با خمشی، اغلب فقط آزمون خمش بر میل‌لنگ اعمال می‌شود. قطر اصلی، طول یاتاقان‌های ثابت، قطر و طول یاتاقان‌گرد به‌عنوان متغیرهای طراحی در بهینه‌سازی هندسه میل‌لنگ در نظر گرفته می‌شود. فشار یاتاقان‌گرد، ضریب ایمنی خستگی، فرکانس اول طبیعی پیچشی و فاصله سوراخ روغن به نزدیکترین پخ، به‌عنوان قیود بهینه‌سازی استفاده می‌گردند. در نهایت استفاده از روش‌های نوین حل عددی مانند روش‌های بدون شبکه‌بندی و بهینه‌سازی جرم، هندسه، قیمت و جز این‌ها برای تولید میل‌لنگ، که قطعه‌ای اساسی در ماشین‌آلات صنعتی است، هنوز جای کار بسیاری برای محققان این رشته باقی گذارده است.

تمامی منابع مورد استفاده در این مقاله به‌صورت مختصر با اطلاعات لازم در جدول ۱ بیان شده است.



شکل ۳. دستگاه آزمون خمش تشدید در مطالعه اسپیتری [۶۰]

جدول ۱. خلاصه‌ای از مطالعات انجام شده دربارهٔ میل لنگ

مرجع	پژوهشگر(ان)	سال	روش بررسی	پارامترهای مورد بررسی
[۱]	گواکلیانو	۱۹۹۳	تجربی	ترک، عامل شدت تنش
[۲]	جنسن	۱۹۷۰	تجربی و آزمایشگاهی	استحکام
[۳]	پندی	۲۰۰۳	آزمایشگاهی	شکست زودرس و ترک
[۵]	کامیمورا	۱۹۸۵	تجربی و آزمایشگاهی	استحکام خستگی
[۶]	چین و همکاران	۲۰۰۵	اجزای محدود، تجربی و آزمایشگاهی	تنش، عامل شدت تنش
[۷]	اسپادافور و همکاران	۲۰۰۹	آزمایشگاهی	شکست خستگی
[۷]	اینفانته و همکاران	۲۰۱۳	تجربی و آزمایشگاهی	ترک
[۸]	فانت و همکاران	۲۰۱۳	تجربی و آزمایشگاهی	ترک
[۹]	کورایشی و همکاران	۲۰۱۳	تجربی و آزمایشگاهی	استحکام خستگی، بهینه‌سازی
[۱۰]	گلیگوریچوک و همکاران	۲۰۰۱	تجربی	استحکام
[۱۱]	بومیک	۲۰۰۲	تحلیلی	ترک و خستگی
[۱۲]	زیارونگ و همکاران	۲۰۰۹	تجربی	استحکام خستگی و ارتعاشی
[۱۳]	ژو و همکاران	۲۰۱۰	اجزای محدود	استحکام خستگی
[۱۴]	پاتیل و همکاران	۲۰۱۳	تحلیلی	استحکام خستگی
[۱۵]	پراکاش و همکاران	۱۹۹۸	اجزای محدود، تجربی	عمر خستگی
[۱۶]	هنری و همکاران	۱۹۹۲	تجربی	استحکام
[۱۷]	مورلتاس	۱۹۹۵	اجزای محدود، تجربی و آزمایشگاهی	تنش
[۱۸]	گوندلاک و همکاران	۱۹۹۸	اجزای محدود، تجربی	حساسیت به فاق
[۱۹]	جیان و همکاران	۲۰۱۰	اجزای محدود	استحکام استاتیکی و خستگی
[۲۰]	گرگ و باگلا	۲۰۱۲	اجزای محدود	تنش
[۲۱]	تریوینی	۲۰۱۳	اجزای محدود	تنش
[۲۲]	باج	۲۰۱۳	اجزای محدود	تنش، خستگی
[۲۳]	جیان و همکاران	۲۰۱۰	عددی	تنش
[۲۴]	منگ و همکاران	۲۰۱۱	عددی	تنش
[۲۵]	چوی و پان	۲۰۰۹	اجزای محدود، تجربی و آزمایشگاهی	تنش، عامل شدت تنش
[۲۷]	یینگ کو و ژیبو	۲۰۱۱	اجزای محدود	تنش، خستگی
[۲۸]	سولانکی و همکاران	۲۰۱۱	اجزای محدود	تنش، خستگی و بهینه‌سازی
[۲۹]	دشبراتار و ساپل	۲۰۱۲	اجزای محدود	تنش، خستگی
[۳۰]	منتظرصدق و فاطمی	۲۰۰۷	اجزای محدود، تجربی و آزمایشگاهی	استحکام خستگی
[۳۱]	لی و همکاران	۲۰۰۷	اجزای محدود	ترک
[۳۲]	منتظرصدق و فاطمی	۲۰۰۸	تحلیلی، تجربی	بهینه‌سازی، استحکام خستگی
[۳۳]	سیمون‌هو و همکاران	۲۰۰۹	تجربی و آزمایشگاهی	استحکام
[۳۴]	گوانگ‌منگ و ژنگ‌فنگ	۲۰۰۹	اجزای محدود و محاسباتی	سختی پیچشی
[۳۵]	لینگ و همکاران	۲۰۱۰	اجزای محدود، تجربی و آزمایشگاهی	تنش، عمر خستگی
[۳۶]	زایوپینگ و همکاران	۲۰۱۰	اجزای محدود	بهینه‌سازی، استحکام

پارامترهای مورد بررسی	روش بررسی	سال	پژوهشگر(ان)	مرجع
استحکام خستگی	اجزای محدود	۲۰۱۱	بالامورگان و همکاران	[۳۷]
استحکام دینامیکی	اجزای محدود و عددی	۲۰۱۱	گانجی و همکاران	[۳۸]
تنش	اجزای محدود	۲۰۱۴	ورون	[۳۹]
ترک	تجربی و آزمایشگاهی	۱۹۹۳	باکستر	[۴۰]
بهینه‌سازی	تجربی	۱۹۹۴	گواگلیانو	[۴۱]
استحکام خستگی	تجربی و آزمایشگاهی	۲۰۰۲	ریگالسکی و همکاران	[۴۲]
شکست و ترک	تجربی و تئوری	۲۰۰۵	چنگلی وانگ و همکاران	[۴۳]
ترک	تجربی و آزمایشگاهی	۲۰۰۳	سیلوا	[۴۴]
ترک	تجربی	۲۰۰۴	یو و همکاران	[۴۵]
ترک	تجربی و آزمایشگاهی	۲۰۰۸	فانت و فریناس	[۴۶]
ترک	تجربی و آزمایشگاهی	۲۰۱۱	تاری و همکاران	[۴۷]
ترک	اجزای محدود و عددی	۲۰۱۱	بسرا و همکاران	[۴۸]
استحکام خستگی	اجزای محدود و عددی	۲۰۱۱	بسرا و همکاران	[۴۹]
بهینه‌سازی ماده	تجربی	۱۹۹۱	نالیچری و همکاران	[۵۰]
بهینه‌سازی	تجربی	۱۹۹۲	هافمن و ترونک	[۵۱]
استحکام، رفتار خستگی	تجربی	۱۹۹۳	پیچارد و همکاران	[۵۲]
بهینه‌سازی، ضریب ایمنی خستگی	تحلیلی	۱۹۹۸	میکولک	[۵۳]
بهینه‌سازی	تئوری	۲۰۰۶	دراستکتز	[۵۴]
استحکام	تجربی	۲۰۰۳	گروم	[۵۵]
عمر و استحکام خستگی	تجربی و آزمایشگاهی	۲۰۰۱	پارک و همکاران	[۵۶]
افزایش عمر و استحکام خستگی	تجربی و آزمایشگاهی	۲۰۰۷	کاسترو و همکاران	[۵۷]
خستگی	تحلیلی	۲۰۱۳	سویک و گورباز	[۵۸]
افزایش عمر و استحکام خستگی	تجربی و آزمایشگاهی	۲۰۰۴	شمساندر	[۵۹]
ترک، استحکام خستگی	تجربی	۲۰۰۵	اسپیتری و همکاران	[۶۰]
ترک، استحکام خستگی	تجربی	۲۰۰۷	اسپیتری و همکاران	[۶۱]

## ۷. مآخذ

- [1] M. Guagliano, A. Terranova, L. Vergani, Theoretical and experimental study of the stress concentration factor in diesel engine crankshafts, *Journal of mechanical design*, Vol. 115, No. 1, pp. 47-52, 1993.
- [2] E. J. Jensen, *Crankshaft strength through laboratory testing*, No. 700526, SAE Technical Paper, 1970.
- [3] R. K. Pandey, Failure of diesel-engine crankshafts, *Engineering failure analysis*, Vol. 10, No. 2, pp. 165-175, 2003.
- [4] T. Kamimura, *Effects of fillet rolling on fatigue strength of ductile cast iron crankshaft*, No. 852204. SAE Technical Paper, 1985.
- [5] W. Y. Chien, J. Pan, D. Close, S. Ho, Fatigue Analysis of Crankshaft Sections Under Bending with Consideration of Residual Stresses, *International Journal of Fatigue*, Vol. 27, pp. 1-19, 2005.
- [6] F. Espadafor, J. Jiménez, B. Villanueva, M. T. García, Analysis of a diesel generator crankshaft failure, *Engineering Failure Analysis*, Vol. 16, No. 7, pp. 2333-2341, 2009.

- [7] V. Infante, J. M. Silva, M. A. R. Silvestre, R. Baptista, Failure of a crankshaft of an aeroengine: A contribution for an accident investigation, *Engineering failure analysis*, Vol. 35, pp. 286-293, 2013.
- [8] M. Fonte, B. Li, L. Reis, M. Freitas, Crankshaft failure analysis of a motor vehicle, *Engineering failure analysis*, Vol. 35, pp. 147-152, 2013.
- [9] I. M. Quraishi, S. Madhavi, Fatigue Strength and Residual Stress Analysis of Deep Rolled Crankshafts.
- [10] R. Gligorijevic, J. Jevtic, G. Vidanovic, N. Radojevic, *Fatigue strength of nodular iron crankshafts*, No. 2001-01-3412. SAE Technical Paper, 2001.
- [11] S. K. Bhaumik, R. Rangaraju, M. A. Venkataswamy, T. A. Bhaskaran, M. A. Parameswara, Fatigue fracture of crankshaft of an aircraft engine, *Engineering Failure Analysis*, Vol. 9, No. 3, pp. 255-263, 2002.
- [12] X. You, X. Ma, B. Wen, Analysis on dynamic characteristics of internal combustion engine crankshaft system, *In 2009 International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation*, vol. 2, pp. 742-745, IEEE, 2009.
- [13] Z. CHENG, G. CAI, X. ZHOU, Y. LI, Finite Element Analysis of YC6108 Diesel Engine Crankshaft, *Equipment Manufacturing Technology*, Vol. 1, p. 013, 2010.
- [14] D. S. Patil, N. M. Morkane, V. B. Lomate, Design & Analysis of Crankshaft Bending Test Rig for Actual Engine Condition, *1<sup>st</sup> International and 16<sup>th</sup> National Conference on Machines and Mechanisms*, Solapur, India, 2013.
- [15] V. Prakash, K. Aprameyan, U. Shrinivasa, An FEM based approach to crankshaft dynamics and life estimation, No. 980565, SAE Technical Paper, 1998.
- [16] J. P. Henry, J. Toplosky, M. Abramczuk, Crankshaft Durability Prediction-A New 3-D Approach, No. 920087, SAE Technical Paper, 1992.
- [17] Z. Mourelatos, An analytical investigation of the crankshaft-flywheel bending vibrations for a V6 engine, No. 951276, SAE Technical Paper, 1995.
- [18] R. Gundlach, M. Semchyshen, E. P. Whelan, Notch Sensitivity and Fatigue in Austempered Ductile Iron, No. 980685, SAE Technical Paper, 1998.
- [19] J. Meng, Y. Liu, R. Liu, B. Zheng, Intension Analysis of 3-D Finite Element Analysis on 380 diesel crankshaft, *In Computational and Information Sciences (ICIS)*, 2010 International Conference on, pp. 1269-1272, IEEE, 2010.
- [20] R. Garg, S. Baghla, Finite element analysis and optimization of crankshaft, *International Journal of Engineering and Management Reaserch*, Vol. 2, No. 6, pp. 26-31, 2012.
- [21] K. Thriveni, B. JayaChandraiah, Modeling and Analysis of the Crankshaft Using Ansys Software, *International Journal of Computational Engineering Research*, Vol. 3, No. 5, pp. 84-88, 2013.
- [22] B. Bagde, L. P. Raut, Finite Element Structural and Fatigue Analysis of Single Cylinder Engine Crank Shaft, *In International Journal of Engineering Research and Technology*, Vol. 2, No. 7 (July-2013), ESRSA Publications, 2013.
- [23] J. Meng, Y. Liu, R. Liu, B. Zheng, 3-D Finite Element Analysis on 480 diesel crankshaft, *In Information Engineering and Computer Science (ICIECS)*, 2010 2<sup>nd</sup> International Conference on, pp. 1-4. IEEE, 2010.
- [24] J. Meng, Y. Liu, R. Liu, Finite element analysis of 4-cylinder diesel crankshaft, *International Journal of Image, Graphics and Signal Processing*, Vol. 3, No. 5, p. 22, 2011.
- [25] K. S. Choi, J. Pan, Simulations of stress distributions in crankshaft sections under fillet rolling and bending fatigue tests, *International Journal of Fatigue*, Vol. 31, No. 3, pp. 544-557, 2009.
- [26] G. Yingkui, Z. Zhibo, Strength analysis of diesel engine crankshaft based on PRO/E and ANSYS, *In 2011 Third International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation*, Vol. 3, pp. 362-364, IEEE, 2011.
- [27] A. Solanki, K. Tamboli, M. J. Zinjuwadia, Crankshaft Design and Optimization-A Review, *In National Conference on Recent Trends in Engineering & Technology*, pp. 13-14, 2011.

- [28] R. J. Deshbhratar, Y. R. Suple, Analysis & Optimization of Crankshaft Using Fem, *International Journal of Modern Engineering Research*, Vol. 2, No. 5, pp. 3086-3088, 2012.
- [29] F. Montazersadgh, A. Fatemi, *Dynamic load and stress analysis of a crankshaft*, No. 2007-01-0258, SAE Technical Paper, 2007.
- [30] F. Montazersadgh, A. Fatemi, Stress analysis and optimization of crankshafts subject to dynamic loading, *Final Project Report Submitted to the Forging Industry Educational Research Foundation and American Iron and Steel Institute, The University of Toledo*, pp. 10-45, 2007.
- [31] X. Lei, G. Zhang, J. Chen, S. Xigeng, G. Dong, Simulation on the motion of crankshaft with a slant crack in crankpin, *Mechanical systems and signal processing*, Vol. 21, No. 1, pp. 502-513, 2007.
- [32] F. Montazersadgh, A. Fatemi, Optimization of a Forged Steel Crankshaft Subject to Dynamic Loading, *SAE International Journal of Materials and Manufacturing*, Vol. 1, No. 2008-01-0432, pp. 211-217, 2007.
- [33] S. Ho, Y. Lee, H. Kang, C. J. Wang, Optimization of a crankshaft rolling process for durability, *International Journal of Fatigue*, Vol. 31, No. 5, pp. 799-808, 2009.
- [34] Z. Guangming, J. Zhengfeng, Study on Torsional Stiffness of Engine Crankshaft, In *Computer Science-Technology and Applications, 2009. IFCSTA'09. International Forum on*, Vol. 3, pp. 431-435. IEEE, 2009.
- [35] S. Ai-ling, Assessment of Residue Fatigue Life of Crankshaft Based on Theory of Fatigue Damage, In *Intelligent Computation Technology and Automation (ICICTA), 2012 Fifth International Conference on*, pp. 674-677, IEEE, 2012.
- [36] X. Chen, X. Yu, B. Ji, Study of crankshaft strength based on iSIGHT platform and DOE methods, In *2010 International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation*, Vol. 3, pp. 548-551. IEEE, 2010.
- [37] C. M. Balamurugan, R. Krishnaraj, M. Sakthivel, K. Kanthavel, M. G. Deepan Marudachalam, R. Palani, Computer Aided Modeling and Optimization of Crankshaft, *International Journal of Scientific and Engineering Research*, Vol. 2, Issue 8, 2011.
- [38] Y. Gongzhi, Y. Hongliang, D. Shulin, Crankshaft dynamic strength analysis for marine diesel engine, In *2011 Third International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation*, Vol. 1, pp. 795-799, IEEE, 2011.
- [39] B. Varun, D. Kumar, D. Kumar Xaxa, V. Uma Rani, M. Sreenivasa Rao, V. Theresa Vinayasheela, Vidya Dhamdhare et al, Stress Analysis and Optimization of Crankshafts Subject to Static Loading, *IJECS* 4, No. 10, 2015.
- [40] W. Baxter, Detection of fatigue damage in crankshafts with the gel electrode, No. 930409, SAE Technical Paper, 1993.
- [41] M. Guagliano, L. Vergani, A Simplified Approach to Crack Growth prediction in a Crankshaft, *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, Vol. 17, No. 11, pp. 1295, 1994.
- [42] Regul'skii, M. N., A. D. Pogrebnyak, O. B. Balakovskii, Procedure and results of investigation into fatigue strength characteristics of motorcycle engine crankshafts, *Strength of materials*, Vol. 34, No. 6, pp. 629-635, 2002.
- [43] C. Wang, C. Zhao, D. Wang, Analysis of an unusual crankshaft failure, *Engineering Failure Analysis*, Vol. 12, No. 3, pp. 465-473, 2005.
- [44] F. S. Silva, Analysis of a vehicle crankshaft failure, *Engineering Failure Analysis*, Vol. 10, No. 5, pp. 605-616, 2003.
- [45] V. Yu, W. Y. Chien, K. S. Choi, Jwo Pan, D. Close, Testing and modeling of frequency drops in resonant bending fatigue tests of notched crankshaft sections, No. 2004-01-1501, SAE Technical Paper, 2004.
- [46] M. Fonte, M. De Freitas, Marine main engine crankshaft failure analysis: a case study, *Engineering Failure Analysis*, Vol. 16, No. 6, pp. 1940-1947, 2009.

- [47] A. Ktari, Haddar, H. F. Ayedi, Fatigue fracture expertise of train engine crankshafts, *Engineering failure analysis*, Vol. 18, No. 3, pp. 1085-1093, 2011.
- [48] J. A. Villanueva, F. J. Espadafor, F. C. Peragon, M. T. García, A methodology for cracks identification in large crankshafts *Mechanical systems and signal processing*, Vol. 25, No. 8, pp. 3168-3185, 2011.
- [49] A. Patil, D. Gajanan, A. Kolhe, CRANKSHAFT FAILURE DUE TO FATIGUE-A, 2014.
- [50] N. Nallicheri, J. P. Clark, F. R. Field, Material Alternatives for the Automotive Crankshaft; A Competitive Assessment Based on Manufacturing Economics, No. 910139, SAE Technical Paper, 1991.
- [51] J. Hoffmann, R. J. Turonek, High performance forged steel crankshafts-Cost reduction opportunities, No. 920784, SAE Technical Paper, 1992.
- [52] C. Pichard, C. Tomme, D. Rezel, Alternative Materials for the Manufacture of Automobile Components: Example of Industrial Development of a Micro-Alloyed Engineering Steel for the Production of Forged Crankshafts, *New and Alternative Materials for the Automotive Industries*, pp. 157-163, 1992.
- [53] A. Mikulec, L. Reams, J. Chottiner, R. W. Page, So-duk Lee. Cranktrain component conceptual design and weight optimization, No. 980566, SAE Technical Paper, 1998.
- [54] A. P. Druschitz, D. C. Fitzgerald, I. Hoegfeldt, Lightweight Crankshafts, SAE-Paper, 2006-01-00162006, 2006.
- [55] J. Grum, Analysis of Residual Stresses in Main Crankshaft Bearings after Induction Surface Hardening and Finish Grinding, *Journal of Automobile Engineering*, Vol. 217, pp. 173-182, 2003.
- [56] H. Park, Y. S. Ko, S. C. Jung. Fatigue life analysis of crankshaft at various surface treatments, No. 2001-01-3374, SAE Technical Paper, 2001.
- [57] G. Castro, A. Fernández-Vicente, J. Cid, Influence of the nitriding time in the wear behaviour of an AISI H13 steel during a crankshaft forging process, *Wear* 263, No. 7, pp. 1375-1385, 2007.
- [58] G. Çevik, R. Gürbüz, Evaluation of fatigue performance of a fillet rolled diesel engine crankshaft, *Engineering Failure Analysis*, Vol. 27, pp. 250-261, 2013.
- [59] S. Shamasundar, Prediction of defects and analysis of grain flow in crank shaft forging by process modeling, No. 2004-01-1499, SAE Technical Paper, 2004.
- [60] P. V. Spiteri, Y. L. Lee, R. Segar, An exploration of failure modes in rolled, ductile, cast-iron crankshafts using a resonant bending testing rig, No. 2005-01-1906, SAE Technical Paper, 2005.
- [61] P. Spiteri, S. Ho, Y. L. Lee, Assessment of bending fatigue limit for crankshaft sections with inclusion of residual stresses, *International journal of fatigue*, Vol. 29, No. 2, pp. 318-329, 2007.

## پی نوشت

- 
- |                                       |  |
|---------------------------------------|--|
| 1. charpy v-notch impact tests        | 14. Carter   |
| 2. shadowgraph                        | 15. Modal  |
| 3. necking                            | 16. FDA  |
| 4. Austempered Ductile Iron (ADI)     | 17. SHWS   |
| 5. ANSYS                              | 18. multidisciplinary collaborative design optimization platform |
| 6. Pro ENGINEER                       | 19. latin hypercube sampling method                              |
| 7. coordinate measuring machine (CMM) | 20. AVL-EXCITE   |
| 8. ADAMS                              | 21. SOLIDWORKS   |
| 9. Von-Misses                         | 22. Gel Electrode technique                                      |
| 10. meta-model method                 | 23. toughness  |
| 11. Monte Carlo simulation technique  | 24. machinable austempered ductile iron (MADI)                   |
| 12. Hooke-Jeeves direct pattern       | 25. surface hardening  |
| 13. Ker Wilson                        |  |