

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه صنعتی شاهرود
دانشکده مهندسی مکانیک و مکاترونیک

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی ساخت و تولید

عنوان

بررسی اثر پارامترهای ساخت رزوه بر ضریب اصطکاک و عمر خستگی در پیچ‌های
سرسیلندر و کپه یاتاقان موتور دیزل دریایی

نگارنده

شهاب مرادی کلارده

استاد راهنما

دکتر سید وحید حسینی

استاد مشاور

دکتر محمدباقر نظری

شهریور ۱۳۹۶

شماره: ۳۱۸۶/۱۴۹
تاریخ: ۹۶/۸/۷

باسمه تعالی



دانشگاه تهران

مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره (۳) صورتجلسه نهایی دفاع از پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

با نام و یاد خداوند متعال، ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد آقای **شهاب مرادی کلارده** با شماره دانشجویی ۹۳۱۵۸۸۴ رشته مهندسی مکانیک - ساخت و تولید تحت عنوان **بررسی اثر پارامترهای ساخت رزوه بر ضریب اصطکاک و عمر خستگی در پیچ های سرسیلندر و کپه یاتاقان موتور دیزل دریایی** که در تاریخ ۹۶/۶/۲۱ با حضور هیأت داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می گردد:

☐ مردود	☒ قبول (با امتیاز ۱۸/۸۳ درجه ۳)
☐ نظری	☒ عملی

عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنما	دکتر سید وحید حسینی	استادیار	
۲- استاد مشاور	دکتر محمدباقر نظری	استادیار	
۳- نماینده تحصیلات تکمیلی	دکتر مهدی وحدتی	استادیار	
۴- استاد ممتحن اول	دکتر سید هادی قادری	استادیار	
۵- استاد ممتحن دوم	دکتر هادی پروز	استادیار	

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده: دکتر محمد محسن شاه مردان

تاریخ و امضاء و مهر دانشکده:

تبصره: در صورتی که کسی مردود شود حداکثر یکبار دیگر (در مدت مجاز تحصیل) می تواند از پایان نامه خود دفاع نماید (دفاع مجدد نباید زودتر از ۴ ماه برگزار شود).

تقدیم نامہ

ماحصل آموختہ ہایم را تقدیم می کنم به آنان کہ مهر آسمانی شان آرام بخش آلام زمینی ام است:

به سبزترین نگاه زندگی ام، چشمان سبز مادرم

به استوارترین تکیه گاهم، دستان پر مهر پدرم

کہ هر چه آموختم در مکتب عشق شما آموختم و هر چه بکوشم قطره ای از دریای بی کران مهربانی تان را سپاس نتوانم بگویم.

سپاس‌گزاری

با سپاس و ستایش پروردگار بلندمرتبه که در سایه عنایت و الطاف بی‌کرانش، این پایان‌نامه به سرانجام رسید و بر اساس حدیث ارزشمند امام رضا (ع) که فرمودند: «مَنْ لَمْ يَشْكُرِ الْمُنْعِمَ مِنَ الْمَخْلُوقِينَ لَمْ يَشْكُرِ اللَّهَ عَزَّ وَ جَلَّ»، بر خود واجب می‌دانم از تمامی افرادی که در این مسیر مرا یاری نمودند تشکر و قدردانی نمایم. از پدر و مادر عزیزم که همواره با کمک‌های مادی و معنوی خود پشتیبانم بوده‌اند بی‌نهایت سپاس‌گزارم. از استاد گرامی‌ام جناب آقای دکتر حسینی که راهنمای علمی و اخلاقی من بودند؛ کمال تشکر و قدردانی را دارم. از آقای دکتر محمدباقر نظری که مشاور بنده در انجام این پایان‌نامه بودند؛ سپاس‌گزارم. همچنین از جناب آقایان مهندس صادق اکبریان، مهندس آرش پولادسنگ و مهندس رضا سعیدنژاد و تمامی دوستان و عزیزانی که در راستای انجام این پژوهش اینجانب را صمیمانه همراهی و یاری نمودند؛ کمال سپاس‌گزاری را دارم. از معاونت آماد نیروی دریایی سپاه، شرکت توسعه قوای محرکه دینا، شرکت تحقیق، طراحی و تولید موتور ایران خودرو و آزمایشگاه تعیین خواص مکانیکی دانشگاه صنعتی شاهرود به‌منظور در اختیار قرار دادن تجهیزات برای انجام این تحقیق کمال تشکر را دارم.

تعهد نامه

اینجانب شهاب مرادی کلارده دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی مکانیک گرایش ساخت و تولید دانشکده‌ی مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان‌نامه ((بررسی اثر پارامترهای ساخت رزوه بر ضریب اصطکاک و عمر خستگی در پیچ‌های سرسیلندر و کپه یاتاقان موتور دیزل دریایی)) تحت راهنمایی دکتر سید وحید حسینی و دکتر محمدباقر نظری

متعهد می‌شوم:

- تحقیقات در این پایان‌نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش‌های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان‌نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج با نام «دانشگاه صنعتی شاهرود» و یا «Shahrood University of Technology» به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان‌نامه تأثیرگذار بوده‌اند در مقالات مستخرج از پایان‌نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت‌های آن‌ها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است، اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه‌های رایانه ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان‌نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

چکیده

موتورهای دیزل دور بالا دارای نسبت توان به وزن بالایی هستند که باعث افزایش تنش‌های سیکلی حرارتی و مکانیکی در موتور می‌شوند که این موضوع به صورت مستقیم بر عملکرد پیچ‌های خاص تاثیر گذاشته و شرایط پیچیده‌ای را برای آنها ایجاد می‌کند. برآورد دقیق نیروی همبندی، روابط بین گشتاور اعمالی و نیروی پیش‌بار، ضریب اصطکاک، تخمین نیروهای حین کار و برآورد عمر خستگی پیچ‌ها در پیش‌بارهای بالا از اصلی‌ترین موضوعات در اتصالات پیچ‌های خاص با استحکام بالا می‌باشد.

در این تحقیق ابتدا فرایند همبندی پیچ استحکام بالای بستار در یک موتور دیزل دریایی دور بالا با روش همبندی گشتاور-زوایه به صورت المان محدود، تحلیلی و تجربی مورد مطالعه قرار می‌گیرد. پس از بررسی صحت عملکرد پیچ‌های ساخته شده در کلاس ۱۲/۹ به صورت همزمان گشتاور اعمالی، تغییر طول اولتراسونیک و همچنین نیروهای همبندی در تمام مراحل بستن اندازه‌گیری شد. به منظور بررسی تاثیر عوامل مختلف در فرایند همبندی، پیچ‌های ساخته شده به صورت نو و کارکرده مورد استفاده قرار گرفتند و عملکرد آنها با پیچ‌های اصلی مقایسه شد. علاوه بر این جهت بررسی اثر وجود پوشش، ضریب اصطکاک پیچ‌ها در دو حالت با و بدون پوشش فسفات روی مطالعه شدند. نتایج نشان می‌دهد که در اولین مرحله همبندی پیچ‌های ساخته شده نو، تغییر شکل جزئی پلاستیک رزوه باعث کاهش نیروی همبندی می‌شود. در مراحل بعدی، افزایش ضریب اصطکاک در زیر گل پیچ می‌تواند در نیروی همبندی تاثیر گذار باشد. همچنین عدم وجود پوشش فسفات روی اگرچه که رزوه با روغن هم روانکاری شود، باعث افزایش ضریب اصطکاک و کاهش نیروی همبندی می‌شود که البته در صورت استفاده از روش همبندی زاویه‌ای، این اثر کاهشی را می‌توان تا حد زیادی کنترل کرد. در اندازه‌گیری طول پیچ با روش اولتراسونیک مشاهده شد که تغییرات سرعت موج اولتراسونیک رابطه نسبتاً خطی با وجود تنش همبندی در پیچ دارد. نتایج این تحقیق نشان داد که تنش محوری عمده تاثیر را بر تغییرات سرعت موج اولتراسونیک می‌گذارد ولی وجود تنش‌های برشی تا حدی می‌تواند باعث کاهش بیشتر سرعت موج هم شود. در نهایت رابطه تغییرات سرعت موج اولتراسونیک بر حسب تنش اعمالی در یک فرایند همبندی واقعی تا محدوده پلاستیک به دست آمد که با استفاده از این رابطه می‌توان با احتمال خطای ۱۰٪ نیروی همبندی پیچ را تخمین زد. در ادامه با استفاده از ضرایب اصطکاک محاسبه شده، مقدار نیروی همبندی در شرایط واقعی تخمین زده شد و اثر نیروهای خارجی و حرارت بر نیروی همبندی به صورت تحلیلی و المان محدود مورد بررسی قرار گرفت. به منظور بررسی عملکرد پیچ در نیروهای کارکرد موتور آزمون خستگی انجام شد که تائید کننده عمر بی‌نهایت پیچ در نیروهای احتراق داخلی موتور بود.

در ادامه این تحقیق به منظور مطالعه اثر فرآیندهای ساخت بر دوام پیچ‌های کپه یاتاقان ثابت، آزمون‌های مقایسه‌ای خستگی پیچ‌ها انجام شد. نتایج نشان داد که فرایند نورد رزوه‌ها پس از عملیات حرارتی در نیروهای همبندی کم و نیروهای نوسانی بالا نسبت به رزوه‌هایی که قبل از عملیات حرارتی نورد شده‌اند عملکرد بهتری از خود نشان خواهند داد. در فرایند ساخت گل پیچ نیز در بارگذارهای مشابه، دوام خستگی فورج سرد نسبت به فورج گرم بهتر است. این در حالی می‌باشد که با نزدیک کردن شرایط بارگذاری به حالت همبندی و کارکرد واقعی در پیچ‌هایی که نورد قبل از عملیات حرارتی و فورج سرد شده‌اند، مکانیزم خرابی و شکست از رزوه به گل پیچ انتقال می‌یابد.

واژگان کلیدی: پیچ استحکام بالا، روش اولتراسونیک، خستگی، نیروی همبندی، موتور دیزل.

مقاله مستخرج از پایان نامه

۱. مرادی کلارده، ش.؛ حسینی، س. و؛ بررسی اثر استفاده از پیچ‌های کارکرده بر ضریب اصطکاک و نیروی همبندی سرسیلندر موتور دیزل دریایی؛ چهارمین کنفرانس ملی و دومین کنفرانس بین‌المللی پژوهش‌های کاربردی در مهندسی برق، مکانیک و مکاترونیک؛ تهران؛ ۱۳۹۵.
۲. مرادی کلارده، ش.؛ حسینی، س. و؛ بررسی اثر تنش ناشی از همبندی بر سرعت موج اولتراسونیک در پیچ بستار موتور دیزل؛ مجله علمی پژوهشی موتورهای درونسوز.
۳. مرادی کلارده، ش.؛ حسینی، س. و؛ نظری، م. ب؛ بررسی اثر فرایندهای ساخت بر عمر خستگی پیچ کپه یاتاقان ثابت موتور دیزل دریایی؛ دهمین همایش بین‌المللی موتورهای درونسوز و نفت؛ تهران؛ ۱۳۹۶.

فهرست عناوین

ز.....	چکیده.....
ح.....	مقاله مستخرج از پایان نامه.....
د.....	تقدیم نامه.....
ه.....	سپاسگزاری.....
ط.....	فهرست عناوین.....
ل.....	فهرست شکل ها.....
ع.....	فهرست جدول ها.....
ص.....	فهرست نشانه ها.....
۱.....	فصل ۱ مقدمه.....
۳.....	۱-۱- مفاهیم اولیه پیچ.....
۴.....	۲-۱- معرفی پیچ های دندان مثلثی ایزومتریک.....
۵.....	۳-۱- مقالات و مروری بر تحقیقات گذشتگان.....
۵.....	۱-۳-۱ گشتاور-کشش.....
۷.....	۲-۳-۱ امواج اولتراسونیک.....
۸.....	۳-۳-۱ خستگی.....
۱۱.....	فصل ۲ فرایندهای ساخت پیچ و صحه گذاری.....
۱۱.....	۱-۲- فرایند ساخت رزوه.....
۱۳.....	۲-۱-۱-۱ نورد پیچ با قالب تخت.....
۱۴.....	۲-۱-۲ نورد پیچ با قالب سیاره ای.....
۱۴.....	۲-۲- مقایسه روش های تولید رزوه به طریق نوردکاری و براده برداری.....
۱۶.....	۳-۲- فرایند ساخت گل پیچ.....
۱۸.....	۴-۲- مشخصات عملکردی پیچ.....
۲۰.....	۵-۲- روش های صحه گذاری کلاسه پیچ.....
۲۳.....	۶-۲- روش های صحه گذاری عملکردی پیچ.....

۲۴	 ۱-۶-۲ محاسبه سفتی
۲۷	 ۲-۶-۲ محاسبه سفتی قطعات اتصال
۲۹	 ۳-۶-۲ مثلث اتصال پیچ
۳۱	 ۴-۶-۲ عملکرد پیچ در اثر اعمال حرارت
۳۲	 ۷-۲ محاسبه ضریب اصطکاک و نیروی همبندی
۳۴	 ۸-۲ محاسبه تغییرات سرعت موج اولتراسونیک در فلزات تحت تنش
۳۸	 ۱-۸-۲ روابط بین تنش و سرعت موج اولتراسونیک
۴۱	 ۲-۸-۲ اندازه‌گیری سرعت اولتراسونیک
۴۲	 ۳-۸-۲ محاسبات خستگی

فصل ۳ آزمون‌های تجربی و تحلیل عددی..... ۴۵

۴۶	 ۱-۳-۱ روش‌های تجربی
۴۶	 ۳-۱-۱ معرفی و دسته‌بندی پیچ‌ها
۴۷	 ۳-۱-۲ آزمون‌های تعیین کلاسه پیچ
۴۸	 ۳-۱-۳ آزمون اندازه‌گیری گشتاور معادل سفت کردن زاویه‌ای در شرایط همبندی واقعی
۵۰	 ۳-۱-۴ آزمون کالیبراسیون نیروسنج
۵۱	 ۳-۱-۵ آزمون اندازه‌گیری گشتاور معادل و نیروی همبندی
۵۲	 ۳-۱-۶ آزمون اندازه‌گیری همزمان نیروی همبندی پیچ و تغییر طول پیچ با استفاده از روش اولتراسونیک
۵۳	 ۳-۱-۷ آزمون خستگی
۵۴	 ۳-۲-۱ شبیه‌سازی عددی
۵۵	 ۳-۲-۲ تعریف مدل هندسی و خواص ماده
۵۷	 ۳-۲-۳ تعیین تعداد مراحل بارگذاری و نوع حل مسئله
۵۷	 ۳-۲-۴ تعیین نوع تماس اجزا و شرایط مرزی
۵۸	 ۳-۲-۴ شبکه‌بندی

فصل ۴ نتایج و بحث..... ۵۹

۵۹	 ۴-۱-۱ نتایج آزمون‌های تعیین کلاس پیچ ساخته شده
۶۰	 ۴-۱-۲ آزمون آنالیز شیمیایی
۶۲	 ۴-۱-۳ آزمون کشش تک‌محوره
۶۳	 ۴-۱-۴ آزمون بار گواه
۶۴	 ۴-۱-۵ آزمون گوه
۶۵	 ۴-۱-۶ ساختار میکروسکوپی

۶۵.....	۴-۱-۶ روش میکروسکوپی
۶۷.....	۴-۱-۷ آزمون سختی سنجی
۶۹.....	۴-۱-۸ آزمون سختی سنجی ویکرز (قبل و بعد از عملیات حرارتی)
۷۰.....	۴-۱-۹ آزمون ضربه
۷۲.....	۴-۱-۱۰ پوشش
۷۳.....	۴-۲- کنترل ابعادی و هندسی
۷۴.....	۴-۳- آزمون‌های وظیفه‌ای
۷۴.....	۴-۳-۱ آزمون اندازه‌گیری گشتاور معادل سفت کردن زاویه‌ای در شرایط همبندی واقعی (آزمون اول)
۷۷.....	۴-۳-۲ آزمون اندازه‌گیری گشتاور معادل نیروی همبندی پیچ (آزمون دوم)
	۴-۳-۳ آزمون اندازه‌گیری همزمان نیروی پیش‌بار و تغییر طول پیچ با استفاده از روش اولتراسونیک (آزمون سوم)
۸۰.....	۴-۴- محاسبه ضریب اصطکاک
۹۳.....	۴-۵- محاسبات اولتراسونیک
۱۰۱.....	۴-۶- بررسی وضعیت عمر پیچ سرسیلندر در شرایط کارکرد واقعی
۱۰۴.....	۴-۶-۱ بررسی اثر حرارت و نیروی احتراق بر نیروی همبندی پیچ
۱۱۱.....	۴-۷- آزمون بررسی تکنولوژی ساخت بر عمر خستگی در پیچ کپه یاتاقان ثابت

فصل ۵ نتیجه‌گیری و ارائه‌ی پیشنهادها..... ۱۱۹

۱۱۹.....	۵-۱- مقدمه
۱۲۳.....	۵-۲- ارائه‌ی پیشنهادها

منبع‌ها..... ۱۲۵

پیوست..... ۱۲۸

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱: طرحواره رزوه داخلی و خارجی پیچ [۱] ۴
- شکل ۱-۲: نورد پیچ با قالب تخت [۲۸] ۱۳
- شکل ۲-۲: نورد پیچ با قالب سیارهای [۲۸] ۱۴
- شکل ۳-۲: خطوط جریان ماده در فرایند ماشینکاری و نورد پیچ الف) نورد سرد قبل از عملیات حرارتی ب) نورد سرد بعد از عملیات حرارتی ج) ماشینکاری قبل از عملیات حرارتی د) ماشینکاری بعد از عملیات حرارتی [۲۵] ۱۶
- شکل ۴-۲: فرایند ساخت به روش کله‌زنی [۲۹] ۱۷
- شکل ۵-۲: آزمون‌های صحه‌گذاری پیچ سرسیلندر ۲۲
- شکل ۶-۲: آزمون‌های صحه‌گذاری پیچ یاتاقان ثابت ۲۳
- شکل ۷-۲: تغییر شکل الاستیک پیچ و صفحات اتصال [۳۱] ۲۴
- شکل ۸-۲: طرحواره روابط بین نیرو و تغییر شکل ۲۵
- شکل ۹-۲: طرحواره تشریح بخش‌های مختلف پیچ و مهره برای محاسبه سفتی [۱] ۲۶
- شکل ۱۰-۲: مدل محاسباتی مخروط فشار اتصال پیچ سرسیلندر [۳۲] ۲۸
- شکل ۱۱-۲: ارتباط نیرو با تغییر طول، الف) صفحات اتصال ب) پیچ [۳۱] ۲۹
- شکل ۱۲-۲: روابط بین نیروی استاتیکی و تغییر شکل پیچ و قطعات متصل [۱۰] ۳۰
- شکل ۱۳-۲: روابط بین نیروی دینامیکی و تغییر شکل پیچ و قطعات متصل ۳۱
- شکل ۱۴-۲: طرحواره نیروهای محوری و پیچشی اعمالی به پیچ [۲] ۳۳
- شکل ۱۵-۲: طرحواره نیروهای محوری و پیچشی اعمالی به پیچ ۳۵
- شکل ۱۶-۲: رابطه بین نیروی محوری و گشتاور-دوران پیچ [۶] ۳۹
- شکل ۱۷-۲: انتشار موج اولتراسونیک در پیچ تحت تنش محوری ۳۹
- شکل ۱۸-۲: اندازه‌گیری زمان انتشار موج TOF ۴۱

- شکل ۳-۱ معرفی و دسته‌بندی پیچ‌ها (الف) پیچ ساخته شده (ب) پیچ اصلی ۴۶
- شکل ۳-۲ همبندی مجموعه سیلندر (الف) همبندی کامل (ب) بلوک سیلندر (پ) پیچ‌های کوتاه و بلند
سرسیلندر (ج) سرسیلندر ۴۹
- شکل ۳-۳ همبندی یاتاقان کپه ۴۹
- شکل ۳-۴ آزمون کشش و کالیبراسیون واکسیر نیروسنج به همراه اکستنسومتر لیزری ۵۰
- شکل ۳-۵ اندازه‌گیری نیروهای همبندی پیچ‌های (الف) کوتاه سرسیلندر (ب) بلند سرسیلندر (ج) یاتاقان
کپه ۵۱
- شکل ۳-۶ اندازه‌گیری زمان انتشار موج اولتراسونیک به همراه واکسیر نیروسنج (الف) پیچ بلند سرسیلندر (ب) پیچ
یاتاقان کپه ۵۳
- شکل ۳-۷ آزمون خستگی پیچ یاتاقان کپه ۵۴
- شکل ۳-۸ محاسبه قطر خارجی مؤثر زیر گل پیچ ۵۵
- شکل ۳-۹ هندسه اجزای مدل شده در نرم‌افزار شبیه‌سازی ۵۶
- شکل ۳-۱۰ نمودار تنش کرنش پیچ بلند سرسیلندر ساخته شده ۵۷
- شکل ۳-۱۱ منحنی استقلال نتایج از شبک‌بندی ۵۸
- شکل ۴-۱ طرحواره نمونه آزمون کشش پیچ ۶۲
- شکل ۴-۲ طرحواره نمونه آزمون گوه پیچ ۶۴
- شکل ۴-۳ تصاویر میکروسکوپی در محلول ظاهر کننده HCl 50% به مدت ۸۰ دقیقه و دمای ۳۰
درجه سانتی‌گراد (الف) پیچ $M18 \times 1.5$ (ب) پیچ $M16 \times 1.5$ ۶۵
- شکل ۴-۴ تصاویر میکروسکوپی سطح مقطع پیچ $M18 \times 1.5$ ۶۶
- شکل ۴-۵ تصاویر میکروسکوپی سطح مقطع پیچ $M16 \times 1.5$ ۶۷
- شکل ۴-۶ طرحواره نقاط سختی سنجی برای آزمون کربن‌زدایی [۱] ۶۸
- شکل ۴-۷ فرایندهای کنترل ابعادی و هندسی پیچ‌های ساخته شده (الف) کنترل پروفیل رزوه (ب)
کنترل ابعادی (ج) کنترل لنگی (د) کنترل انطباقات ۷۴

- شکل ۴-۸ نمودار نیروی همبندی و گشتاور پیچ یاتاقان کپه ۷۸
- شکل ۴-۹ نمودار نیروی همبندی و گشتاور پیچ کوتاه سرسیلندر ۷۸
- شکل ۴-۱۰ نمودار نیروی همبندی و گشتاور پیچ بلند سرسیلندر ۷۹
- شکل ۴-۱۱ نمودار نیروی همبندی و گشتاور پیچ یاتاقان کپه ۸۱
- شکل ۴-۱۲ نمودار نیروی همبندی و گشتاور پیچ کوتاه سرسیلندر ۸۱
- شکل ۴-۱۳ نمودار نیروی همبندی و گشتاور پیچ بلند سرسیلندر ۸۲
- شکل ۴-۱۴ تغییرات زبری سطح زیر گل پیچ الف) قبل از همبندی ب) بعد از همبندی ۸۳
- شکل ۴-۱۵ نمودار نیروی همبندی و تغییرات طول پیچ یاتاقان کپه ۸۶
- شکل ۴-۱۶ نمودار نیروی همبندی و تغییرات طول پیچ کوتاه سرسیلندر ۸۶
- شکل ۴-۱۷ نمودار نیروی همبندی و تغییرات طول پیچ بلند سرسیلندر ۸۷
- شکل ۴-۱۸ نمودار ضریب اصطکاک و فرایند بستن پیچ یاتاقان کپه ۹۰
- شکل ۴-۱۹ نمودار ضریب اصطکاک-فرایند بستن پیچ کوتاه سرسیلندر ۹۱
- شکل ۴-۲۰ نمودار ضریب اصطکاک-فرایند بستن پیچ بلند سرسیلندر ۹۲
- شکل ۴-۲۱ تغییرات زمان انتشار موج اولتراسونیک نسبت به تنش در پیچ یاتاقان کپه ۹۴
- شکل ۴-۲۲ تغییرات زمان انتشار موج اولتراسونیک نسبت به تنش در پیچ کوتاه سرسیلندر ۹۴
- شکل ۴-۲۳ تغییرات زمان انتشار موج اولتراسونیک نسبت به تنش در پیچ بلند سرسیلندر ۹۵
- شکل ۴-۲۴ نمودار تغییرات سرعت موج اولتراسونیک نسبت به تنش پیچ یاتاقان کپه ۹۶
- شکل ۴-۲۵ نمودار تغییرات سرعت موج اولتراسونیک نسبت به تنش پیچ کوتاه سرسیلندر ۹۶
- شکل ۴-۲۶ نمودار تغییرات سرعت موج اولتراسونیک نسبت به تنش پیچ بلند سرسیلندر ۹۷
- شکل ۴-۲۷ گسترش ناحیه پلاستیک پیچ M12 (a) در کشش خالص (b) در فرایند همبندی [۳] ۹۸
- شکل ۴-۲۸ اثر ضریب اصطکاک بر روی گسترش ناحیه پلاستیک پیچ M12 [۳] ۹۹
- شکل ۴-۲۹ مقایسه ضرایب اصطکاک پیچهای کوتاه و بلند سرسیلندر در آزمون سوم ۱۰۰

- شکل ۴-۳۰ محاسبه نیروهای همبندی پیچ‌های کوتاه و بلند سرسیلندر در مرحله اول و مقایسه با نیروی‌های اندازه‌گیری شده با نیروسنج در آزمون سوم ۱۰۲
- شکل ۴-۳۱ محاسبه نیروهای همبندی پیچ‌های کوتاه و بلند سرسیلندر در مرحله دو و مقایسه با نیروی‌های اندازه‌گیری شده با نیروسنج در آزمون سوم ۱۰۲
- شکل ۴-۳۲ محاسبه اثر نیروهای خارجی و حرارت بر پیچ‌های کوتاه و بلند سرسیلندر در همبندی اول ۱۰۷
- شکل ۴-۳۳ محاسبه اثر نیروهای خارجی و حرارت بر پیچ‌های کوتاه و بلند سرسیلندر در همبندی دوم ۱۰۷
- شکل ۴-۳۴ توزیع تنش مؤثر ون-میسز در اجزای اتصال بر حسب مگاپاسکال ۱۰۹
- شکل ۴-۳۵ آزمون توزیع نیروی اعمالی پیچ‌ها با کاغذ فوجی ۱۱۰
- شکل ۴-۳۶ نمودار خستگی با معیار گودمن ۱۱۳
- شکل ۴-۳۷ نمودار تغییرات عمر خستگی پیچ‌های تولید شده با روش‌های مختلف در نیروهای همبندی متفاوت ۱۱۴
- شکل ۴-۳۸ نمودار مقایسه عمر خستگی پیچ‌های تولید شده با روش‌های ساخت مختلف گل پیچ در نیروهای همبندی کم و بار نوسانی زیاد ۱۱۵
- شکل ۴-۳۹ نمودار مقایسه عمر خستگی پیچ‌های تولید شده با روش‌های ساخت رزوه در نیروهای همبندی کم و بارهای نوسانی زیاد ۱۱۶
- شکل ۴-۴۰ بررسی مکانیزم شکست پیچ‌های ساخته شده در نیروهای همبندی مختلف ۱۱۶
- شکل ۴-۴۱ شکست خستگی پیچ‌های ساخته شده $M18 \times 1.5$ ۱۱۷
- شکل ۴-۴۲ شکست خستگی پیچ‌های اصلی $M18 \times 1.5$ ۱۱۸

فهرست جدول‌ها

جدول ۱-۳ دسته‌بندی پیچ‌ها مورد تحقیق	۴۷
جدول ۲-۳ روش همبندی پیچ‌های کوتاه و بلند بستر و پیچ یاتاقان کپه	۴۸
جدول ۳-۳ خواص مکانیکی پیچ و چدن خاکستری	۵۶
جدول ۱-۴ ترکیب شیمیایی پیچ ساخته شده کپه یاتاقان و سرسیلندر و پیچ اصلی سرسیلندر موتور دیزل	۶۱
جدول ۲-۴ ترکیب شیمیایی پیچ استاندارد کلاس ۱۲/۹	۶۰
جدول ۳-۴ آزمون کشش پیچ کپه یاتاقان $M18 \times 1.5$ و پیچ بلند سرسیلندر $M16 \times 1.5$ ساخته شده	۶۳
جدول ۴-۴ آزمون کشش گوه پیچ ساخته شده سرسیلندر و یاتاقان کپه	۶۴
جدول ۵-۴ آزمون سختیسنجی ویکرز پیچ $M18 \times 1.5$	۶۹
جدول ۶-۴ آزمون سختیسنجی ویکرز پیچ $M16 \times 1.5$	۶۹
جدول ۷-۴ آزمون سختیسنجی به روش ویکرز (قبل و بعد از عملیات حرارتی) پیچ $M18 \times 1.5$ ساخته شده	۷۰
جدول ۸-۴ آزمون سختیسنجی به روش ویکرز (قبل و بعد از عملیات حرارتی) پیچ $M16 \times 1.5$ ساخته شده	۷۰
جدول ۹-۴ آزمون ضربه شاریپی در دمای ۲۰- درجه سانتی‌گراد	۷۲
جدول ۱۰-۴ آزمون ضربه شاریپی در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد	۷۲
جدول ۱۱-۴ ترکیب شیمیایی پوشش پیچ‌های ساخته شده (SEM)	۷۳
جدول ۱۲-۴ ترکیب شیمیایی پوشش پیچ‌های اصلی (SEM)	۷۳
جدول ۱۳-۴ گشتاورهای اعمالی در مراحل مختلف همبندی پیچ اصلی و ساخته شده یاتاقان کپه..	۷۵
جدول ۱۴-۴ گشتاورهای اعمالی در مراحل مختلف همبندی پیچ اصلی و ساخته شده سرسیلندر ...	۷۶

- جدول ۴-۱۵ گشتاورهای بازکردن پیچ‌های اصلی و ساخته شده آزمون دوم ۸۰
- جدول ۴-۱۶ گشتاورهای بازکردن پیچ‌های اصلی و ساخته شده آزمون سوم ۸۵
- جدول ۴-۱۷ تغییرات طول پیچ‌ها ۸۸
- جدول ۴-۱۸ نیروهای همبندی محاسبه شده آزمون اول و تغییرات آنها ۱۰۴
- جدول ۴-۱۹ مشخصات پیچ‌های کوتاه و بلند سرسیلندر ۱۰۵
- جدول ۴-۲۰ سفتی‌های محاسبه شده برای پیچ‌ها، واشر سرسیلندر و عضوهای اتصال ۱۰۶
- جدول ۴-۲۱ عمر خستگی پیچ‌های یاتاقان کپه ۱۱۲

فهرست نشانه‌ها

d	قطر نامی پیچ	K	سفتی کل
d_2	قطر متوسط پیچ	K_{CB}	سفتی سرسیلندر
p	گام پیچ	K_{CH}	سفتی سیلندر
d_h	قطر آزاد سوراخ پیچ	K_W	سفتی واشر
d_k	قطر گل پیچ	K_b	سفتی پیچ
d_w	قطر زیر گل پیچ	K_Q	سفتی رزوه‌های بلوک سیلندر
D_A	قطر خارجی استوانه اتصال	K_M	سفتی عضوها
φ_E	نصف زاویه مخروط فشار	K_G	سفتی رزوه‌های درگیر پیچ
k	ثابت ضریب گشتاور	K_{SK}	سفتی گل پیچ سر شش گوش
F	نیروی خارجی	E	مدول یانگ
F_t	نیروی کل پیچ	E_b	مدول یانگ پیچ
$\dot{F}_p$	نیروی همبندی باقی‌مانده	L	طول کل
F_m	نیروی عضوها	w	ثابت نوع اتصال
F_b	نیروی پیچ	A	مساحت
F_a	نیروی دینامیکی پیچ	f_i	ازدیاد طول الاستیک
F_m	نیروی متوسط پیچ	δ_i	انعطاف‌پذیری الاستیک
ΔX_M	تغییر طول عضوها	δ_b	انعطاف‌پذیری پیچ
ΔX_W	تغییر طول واشر	δ_{SK}	انعطاف‌پذیری گل پیچ
ΔX_{CH}	تغییر طول سیلندر	δ_{GQ}	انعطاف‌پذیری رزوه‌های درگیر
ΔX_{CB}	تغییر طول سرسیلندر	δ_Q	انعطاف‌پذیری رزوه‌های مهره
ΔX_b	تغییر طول پیچ	δ_G	انعطاف‌پذیری رزوه‌های پیچ

δ_b تغییر طول پیچ در اثر بار خارجی

δ_T تغییرات طول در اثر تغییرات دما

α_T ضریب انبساط حرارتی

ΔT تغییرات دما

T_t گشتاور غلبه بر اصطکاک رزوها

T_u گشتاور غلبه بر اصطکاک گل پیچ

T گشتاور کل

μ_t ضریب اصطکاک رزوها

μ_u ضریب اصطکاک گل پیچ

μ_m ضریب اصطکاک کل

f ثابت الاستیک غیرخطی

g ثابت الاستیک غیرخطی

C سرعت حقیقی موج اولتراسونیک

V سرعت ظاهری موج اولتراسونیک

ρ چگالی

ω فرکانس

n تعداد موج

t زمان

σ_y استحکام تسلیم

σ_{TS} استحکام کششی

σ_{FL} استحکام خستگی

σ_m تنش متوسط

فصل ۱ مقدمه

شناخت روش‌های اتصال قطعات و داشتن درک عمیق از عملکرد بست‌ها و اتصالات در همه شرایط کاربرد و طراحی بسیار مهم است. پیچ‌ها پرکاربردترین قطعه صنعتی هستند که نقش بسیار مهمی را در همبندی گیردائم ساده‌ترین وسایل و ابزارها تا پیچیده‌ترین ماشین‌آلات به ویژه در موتورهای احتراق داخلی ایفا می‌کنند. برخلاف اتصالاتی مثل جوش و پرچ، اتصالات پیچ و مهره‌ای را می‌توان بدون آنکه آسیبی به خود و قطعات متصل شونده برسانند، از هم باز کرد و به دفعات به یکدیگر متصل نمود. پیچ‌ها بر اساس وظیفه‌هایی که به آن محول می‌شود دارای طبقه‌بندی‌های مختلفی می‌باشند. اتصالات پیچی بر اساس نیروی اعمالی خارجی به دو دسته تقسیم می‌شوند. اگر نیروی اعمالی موازی با محور پیچ باشد به آن اتصال کششی و اگر نیروی اعمالی عمود بر محور پیچ باشد به آن اتصال برشی می‌گویند. تمیز دادن این دو نوع اتصال به دلیل واکنش پیچ در برابر بارگذاری، نحوه خراب شدن، روش مونتاژ کردن و ... از اهمیت بالایی برخوردار است. به صورت عمومی در بررسی رفتار و خرابی پیچ‌ها، اتصالات کششی پیچیدگی بیشتر و کاربرد عمومی‌تری دارند. هدف از اتصالات پیچی ایجاد نیروی بستن می‌باشد. سفت

کردن پیچ در هر دو حالت کششی و برشی سبب ایجاد نیروی همبندی^۱ بر روی قطعات و پیچ می‌شود. نیروی همبندی در پیچ‌ها باید به اندازه‌ی کافی بزرگ باشد تا از شل شدن پیچ در معرض سیکل‌های حرارتی ناشی از گرم شدن و بارهای سیکلی ناشی از فشار احتراق جلوگیری کند. اگرچه ممکن است مقداری تغییر شکل پلاستیک در رزوه‌های پیچ در طول فرایند همبندی ایجاد شود اما اکثر قسمت‌های پیچ و قطعات متصل شده می‌بایست در حالت الاستیک باقی بمانند. در موتورهای احتراق داخلی پیچ‌های سرسیلندر وظیفه اتصال سرسیلندر به بلوک موتور با حفظ شرایط آب‌بندی هم‌زمان گازهای محفظه احتراق، آب و روغن را توسط واشر سرسیلندر بر عهده دارند. در صورتیکه در حین کارکرد موتور تغییر شکلی در پیچ اتفاق بیافتد، فشار همبندی واشر سرسیلندر کاهش یافته و امکان اختلاط گاز محفظه احتراق با آب و روغن وجود خواهد داشت. پیچ‌های کپه یاتاقان ثابت موتور دیزل دریایی پرسرعت، وظیفه نگهداری مجموعه میل‌لنگ، پیستون و شاتون را برعهده دارند. این مجموعه که می‌تواند در سرعت‌های دورانی بالایی تا ۳۱۰۰ rpm کارکرد داشته باشد، بارهای دینامیکی قابل توجهی را به دلیل وجود نابالانسی در میل‌لنگ و ضربات ناشی از وجود فشار سیکلی احتراق به پیچ وارد خواهد کرد و پیچ‌ها می‌بایست مقاومت به خستگی پرچرخه قابل توجهی داشته باشند. بنابراین تحلیل و بررسی رفتار پیچ‌ها و جلوگیری از خرابی آنها در عملکردهای حساس بسیار مهم و ضروری است.

در این فصل، نخست مفاهیم اولیه پیچ، انواع پیچ‌ها و استانداردهای آن دسته‌بندی و معرفی شده است. سپس مروری بر پژوهش‌های انجام شده توسط محققان دیگر در این حوزه ارائه می‌شود. در پایان این فصل نیز اهداف پایان‌نامه ذکر خواهد شد. در فصل دوم در ابتدا فرایندهای ساخت پیچ و عوامل تاثیر گذار بر عملکرد پیچ بحث می‌شود. سپس به بررسی روش‌های صحه‌گذاری پیچ پرداخته خواهد شد. در فصل سوم آزمون‌های صحه‌گذاری انجام شده بر روی پیچ‌های سرسیلندر و کپه یاتاقان ارائه می‌شود. در نهایت در فصل چهارم به بررسی نتایج و بحث در مورد تاثیر پارامترهای ساخت بر عملکرد پیچ می‌پردازد.

¹ Clamping force

۱-۱- مفاهیم اولیه پیچ

به طور کلی از پیچ‌ها به منظور اتصال و یا انتقال حرکت استفاده می‌شود. با اینکه پیچ‌های اتصال و انتقال حرکت از لحاظ عملکرد متفاوت می‌باشند، اما ساختمان آنها از نظر تئوری مشابه یکدیگر است. تمامی روزه‌ها دارای ویژگی‌های اساسی یکسانی می‌باشند که وقتی تعریف می‌شوند به صراحت و دقت تمامی ابعاد مربوط به شکل پیچ را می‌سازند. واژه‌های فنی روزه‌ها در شکل ۱-۱ چنین است:

گام (P): فاصله نقاط مشابه بر روی دو دنده مجاور را گام پیچ می‌گویند. این اندازه‌گیری در جهت موازی با محور اصلی صورت می‌پذیرد. گام در سیستم اینچی معکوس تعداد دنده در هر اینچ است.

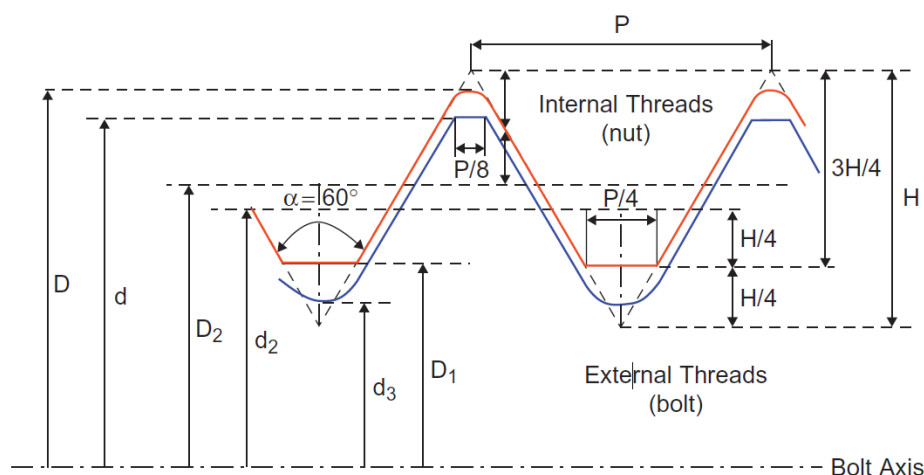
قطر بزرگ (d): در روزه مستقیم بزرگترین قطر پیچ را قطر بزرگ می‌گویند که در روزه‌های داخلی از ریشه روزه و در روزه‌های خارجی از قله روزه عبور می‌کند. علاوه بر قطر خارجی، پیچ‌ها دو قطر دیگر نیز دارند.

قطر کوچک (d₃): کوچک‌ترین قطر پیچ است که در روزه‌های داخلی از قله روزه‌ها و در روزه‌های خارجی از ریشه روزه‌ها عبور می‌کند.

قطر متوسط (d₂): قطر استوانه هم محوری است که از میان پروفیل روزه به گونه‌ای می‌گذرد که در آن عرض شیار روزه برابر نصف گام است. برای اندازه‌گیری این قطر از قرار دادن میله و یا ساچمه‌های اندازه‌گیری در دو طرف شیار روزه‌ها استفاده می‌شود.

ارتفاع روزه (H): به فاصله شعاعی بین ریشه تا قله روزه می‌گویند.

زاویه مارپیچ (α): زاویه‌ای که مارپیچ روزه با محور روزه می‌سازد. محور روزه همان محور استوانه است. روزه‌های یک یا چند راهه: روزه یک راهه از یک شیار که به دور استوانه با گام مشخصی دوران می‌کند، به وجود می‌آید. اغلب روزه‌ها را یک راهه می‌سازند. روزه‌های دو یا چند راهه از دو یا چند ردیف دنده که در کنار هم قرار دارند، به وجود می‌آیند. همه روزه‌ها را راست‌گرد می‌سازند مگر اینکه ذکر شود.



شکل ۱-۱: طرحواره رزوه داخلی و خارجی پیچ [۱]

۱-۲- معرفی پیچ‌های دندانه مثلثی ایزومتریکی^۱

در پی ابهام‌آمیز بودن استانداردها، مجمع بین‌المللی در سال ۱۸۹۸ در سوئیس گرد هم آمدند و در نهایت رزوه دندانه متریک S.I را به‌عنوان رزوه استاندارد معرفی نمودند. کشورهای اروپایی زیادی این استاندارد را به‌عنوان استاندارد ملی خود پذیرفتند. استاندارد جدید یونیفاید و ایزومتریکی هر دو دارای اندازه و شکل اصلی یکسانی هستند که در اندازه‌های استاندارد خود تنها در قطر و گام با هم متفاوت می‌باشند. رزوه‌های یونیفاید و ایزومتریکی هیچ‌گاه نباید با یکدیگر همبندی شوند؛ اما در مواردی که تِلرانس رزوه‌های ایزومتریکی و یونیفاید بر روی همدیگر هم پوشانی داشته باشند با یکدیگر سازگار هستند. تمام اندازه‌های ابعادی این دسته از پیچ‌ها برحسب میلی‌متر و زاویه سر آنها ۶۰ درجه است. سر دنده این رزوه‌ها به حالت تخت و ته دنده گرد می‌باشد. این پیچ‌ها جزو پیچ‌های اتصال اصلی هستند و با علامت M مشخص می‌شوند و به سه گروه دنده ریز، دنده متوسط، و دنده درشت تقسیم می‌شوند. پیچ‌های دنده ریز و یا ظریف دارای گام و عمق دنده کوچک‌تری هستند و در محل‌هایی که قطعات اتصال تحت تأثیر ارتعاش و ضربه زیاد قرار دارند، مورد استفاده قرار می‌گیرند. سیستم تِلرانسی رزوه پیچ‌ها باید قابلیت تعویض رزوه‌های خارجی و داخلی را برآورده سازد. این تِلرانس به دقت قطر، گام و

^۱ ISO Metric

زاویه دندانه رزوه بستگی دارد. کلاس تیرانس به وضعیت کیفیت سطح پیچ (ظریف، متوسط و خشن) نیز بستگی دارد. پیچ با پوشش گالوانیکی ضخیم نسبت به سطح فسفا ته شده یا سطح بدون پوشش نیاز به لقی بیشتر مثلاً کلاس 5H می باشد.

شکل های مختلف استاندارد پیچ ها در سیستم ایزومتری ک (برای مثال پیچ های ورق، رزوه لوله مخروطی، رزوه لوله استوانه، رزوه دندانه مربعی اصلاح شده و...) به حدی زیاد است که امکان گردآوری آنها در مقدمه مقدور نمی باشد و در موضوع تحقیق نمی گنجد.

۱-۳- مقالات و مروری بر تحقیقات گذشتگان

با توجه به کاربرد وسیع پیچ ها در صنایع، تحقیقات بسیاری بر روی پیچ ها انجام شده است. در سال های اخیر فعالیت های پژوهشی قابل توجهی در زمینه های مختلف با موضوعیت پیچ ها با هدف دستیابی به یک اتصال ایمن به کمک تحلیل های عددی، تجربی و المان محدود صورت گرفته است.

۱-۳-۱ گشتاور-کشش

یکی از عوامل مهم به منظور پیش بینی نیروی همبندی، تشخیص ضریب اصطکاک در اتصالات پیچی می باشد که برای این منظور مقادیر گشتاور اعمالی باید به صورت دقیق گزارش شود. کروکلو و همکاران گشتاور اعمالی به پیچ و نیروی همبندی را توسط آچار گشتاور/ زاویه^۱ و کرنش سنج^۲ اندازه گیری و مقادیر ضریب اصطکاک و ضریب گشتاور پیچ را محاسبه کردند [۲]. فوکویکا و تاکاکی در چند پژوهش به بررسی تمرکز تنش در رزوه ها به هنگام همبندی پیچ با استفاده از روش کنترل گشتاور پرداختند. همچنین اثرات تغییر شکل پلاستیک بر رفتار مکانیکی پیچ را به روش المان محدود مورد مطالعه قرار دادند [۳-۵]. علاوه بر آن اصطکاک به عنوان عاملی موثر بر نیروی محوری و گشتاور بستن پیچ به صورت

^۱ Torque wrench

^۲ Strain gauge

تجربی و عددی مورد مطالعه قرار گرفت. از این رو ضریب اصطکاک سطوح فشار رزوه پیچ و سطح بارگذاری مهره با مقایسه تغییرات گشتاور و نیروی محوری با اندازه‌گیری نیروی محوری پیچ، نسبت گشتاور اعمالی کل به گشتاور مهره و گشتاور اصطکاک رزوه تخمین زده شد [۶]. درآوید و همکاران به بررسی اثر گشتاور همبندی بر شل شدن پیچ پرداختند. برای این منظور از سه گشتاور متفاوت و از دو واشر فنی و تخت استفاده کردند. علاوه بر این، اتصال بدون واشر نیز برای مقایسه عملکرد واشر در شل شدن پیچ بررسی شد. نتایج تجربی به صورت نقطه شروع و نرخ شل شدن پیچ گزارش شد [۷]. ارگاتو و سواستیانو از مقاومت الکتریکی به عنوان عامل تشخیص سلامتی در اتصالات پیچی استفاده نمودند و یک رابطه برای ارتباط دادن بین تغییرات هدایت الکتریکی و تغییرات گشتاور همبندی به صورت عددی ارائه کردند [۸]. در بررسی رفتار یک اتصال پیچی ساده تحت اثر بارگذاری کششی جداکننده، ولیامز و همکاران با استفاده از روش‌های محاسبات عددی سنتی، روش المان محدود و تجربی به مطالعه آن پرداختند. نتایج نشان داد که برخی از جزئیات برای اطمینان از نتایج مدل‌سازی مانند مدل کردن برهم‌کنش رزوه‌ها نیاز نمی‌باشد. همچنین روش‌های محاسبات سنتی در پیش‌بینی اثرات بار خارجی بر روی تغییرات نیروی همبندی مقادیر بیشتری را نسبت به نتایج تجربی و مدل شبیه‌سازی شده ارائه می‌دهند [۹]. همچنین لی و همکاران در سه قطعه متصل شده توسط پیچ با ضریب انبساط حرارتی متفاوت نشان دادند که افزایش حرارت و نیروی خارجی چگونه نیروی بستن را تا صفر کاهش می‌دهد و اینکه چگونه سفتی بر رابطه بین نیروی همبندی و حرارت اثر می‌گذارد [۱۰]. تاگوچی و همکاران برای پوشش‌دهی قطعات با اشکال پیچیده مثل پیچ‌ها و مهره‌ها از یک روش جدید استفاده کردند. بررسی تصاویر میکروسکوپی نشان داده است که سطح پیچ و مهره‌ها به صورت یکنواخت، بسیار صاف، با ضخامت یکسان و بدون عیوب/چاله قابل توجه با فیلم آلومینیوم پوشش‌دهی شده است [۱۱].

۱-۳-۲ امواج اولتراسونیک

سرعت موج اولتراسونیک در تئوری کشسانی خطی تنها با مدول الاستیک و متوسط چگالی محاسبه می‌شود. در حقیقت سرعت موج اولتراسونیک وابسته به تنش می‌باشد که با افزایش تنش این وابستگی غیرخطی است. کیم و همکاران به معرفی الاستیک غیرخطی پرداختند. بعلاوه نسبت مدول الاستیک غیرخطی را تا مرتبه چهار محاسبه کرده و بر روی تنش داخلی با آزمون تجربی و شبیه‌سازی بحث کردند. نتایج نشان می‌داد که ثابت الاستیک مرتبه سوم در شیب منحنی سرعت موج اولتراسونیک و تنش در ناحیه پلاستیک دخالت دارد که با نتایج تجربی تطابق خوبی داشت [۱۲]. برگرمن و شاهبندر به بررسی تجربی تغییرات سرعت موج اولتراسونیک طولی و برشی در جهت عرضی آلومینیوم تحت تنش پرداختند. نتایج تجربی نشان داد که تغییرات سرعت موج طولی اولتراسونیک مستقل از تغییرات مدول الاستیک و وابسته به تغییرات چگالی است اما تغییرات سرعت در موج‌های برشی علاوه بر چگالی و مدول یانگ به نوع موج برشی (عمودی و افقی) نیز وابسته می‌باشد [۱۳]. ویلبراندت و همکاران از روش اولتراسونیک برای اندازه‌گیری پیش‌بار پیچ‌های استحکام بالایی که به‌منظور غلبه بر بارهای مکانیکی در یک سیستم مغناطیسی تا محدوده تسلیم بسته شده بودند، استفاده کردند. در این تحقیق مدول یانگ، سرعت موج اولتراسونیک و دما عوامل تأثیرگذار بر اندازه‌گیری بود که برای هر پیچ با جنس و ابعاد مختلف فرایند کالیبراسیون انجام می‌گرفت [۱۴]. جی هانگ و همکاران نیز به محاسبه تنش پیچ‌ها بر اساس سرعت موج اولتراسونیک و زمان انتشار موج پرداختند. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش گشتاور سرعت موج اولتراسونیک کاهش می‌یابد [۱۵]. کیم و هونگ نیز به اندازه‌گیری تنش‌های محوری در پیچ‌های استحکام بالا که تا ۹۰٪ استحکام تسلیم کشیده شده بودند با استفاده از موج طولی و برشی اولتراسونیک پرداختند. نتایج تجربی حاصل از ترکیب هر دو موج اولتراسونیک در مقایسه با نتایج تئوری خطایی حدود ۵٪ را نشان داد [۱۶]. هارتمن به مطالعه محدودیت‌های روش اندازه‌گیری نیروی هم‌بندی در پیچ‌ها پرداخت و بیان نمود که تغییرات سرعت موج اولتراسونیک علاوه بر تنش به دما و تغییر طول پیچ نیز وابسته می‌باشد. توزیع دما در سرتاسر پیچ را نمی‌توان ثابت فرض کرد که این امر امکان

اندازه‌گیری دما را غیر ممکن و اندازه‌گیری با موج اولتراسونیک را همراه با خطا می‌سازد. علاوه بر این اندازه‌گیری با روش اولتراسونیک در محدوده پلاستیک همراه با خطا می‌باشد. این روش قادر به تشخیص محدوده الاستیک خالص و یا تغییر شکل پلاستیک نیست [۱۷].

۱-۳-۳ خستگی

استیون و همکاران در سه پژوهش پیوسته به مطالعه رفتار خستگی پیچ‌های استحکام بالای SI کلاس ۱۲/۹ دندان درشت و ریز از جنس فولاد استاندارد پرداختند. پیچ‌ها به دو صورت قبل و بعد نورد عملیات حرارتی شدند. نیروی همبندی به صورت درصدی از تنش تسلیم انتخاب شد که برای پیچ‌های نورد شده قبل عملیات حرارتی برابر ۱٪، ۵۰٪، ۷۵٪ و ۱۰۰٪ بود. از آنجا که استحکام تسلیم پیچ‌های نورد شده بعد از عملیات حرارتی ۱۰٪ کمتر از پیچ‌های نورد شده قبل از عملیات حرارتی بود، نیروی همبندی انتخابی برای این پیچ‌ها ۱۰٪ بیشتر از استحکام تسلیم انتخاب شد. شکست ناشی از خستگی در اکثر نمونه‌ها در اولین رزوه بین پیچ و مهره با ترک هلالی شکل اتفاق افتاد. ارزیابی‌های SEM نشان داد که تمامی ناحیه رشد ترک خستگی دارای چندین عامل خستگی بوده و ناحیه شکست شامل گودی شکست ترد نهایی می‌باشد. رچتینگ/خزش در نیروهای همبندی کمتر یا برابر ۷۵٪ مشاهده نشد. نتایج آزمون در نیروهای همبندی ۱٪ استحکام تسلیم پیچ‌های نورد شده بعد از عملیات حرارتی، افزایش استحکام عمر خستگی در پیچ‌های دندان درشت تا ۱۴۷٪ و در دندان ریز تا ۱۵۸٪ نسبت به پیچ‌های نورد شده قبل از عملیات حرارتی را نشان داد. این نتیجه در سایر نسبت‌های کوچک نیز برقرار بود. افزایش استحکام به خستگی پیچ‌های دندان ریز نورد شده بعد از عملیات حرارتی در نسبت‌های بزرگتر در حدود ۶۹٪ تا ۳۰٪ نیز برقرار بود. اما در نیروهای همبندی بالا، استحکام خستگی پیچ‌های دندان درشت نورد شده بعد از عملیات حرارتی افزایشی نیافت. نتایج در تمامی موارد برای پیچ‌های دندان ریز با استاندارد VDI تطابق داشت که در پیچ‌های دندان درشت این گونه نبود [۱۸-۲۰]. گرایزا و همکاران به بررسی اثر طول پیچ بر رفتار خستگی پرداختند و از کنترل گشتاور به منظور پیدا کردن نیروی

همبندی استفاده کردند. بررسی‌ها نشان داد که افزایش طول پیچ سبب افزایش استحکام خستگی شده است و در تعیین ضریب بارگذاری مقادیر متفاوتی بین نتایج تئوری و عملی مشاهده نمودند [۲۱]. ناویل و همکاران شکست غیرقابل پیش‌بینی در بارهای سیکلی را با روش تحلیل خرابی مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد که هیچ‌گونه نشانه‌ای از خستگی و یا تغییر شکل پلاستیک وجود ندارد و دلیل شکست، ترک تنش هیدروژنی (HSC) می‌باشد [۲۲]. یو و زو به بررسی شکست پیچ سرسیلندر موتور دیزل پرداختند. بررسی شکست و متالوگرافی سطح پیچ شکسته شده، شکاف و شبه شکاف‌هایی را نشان داد. صفحات شعاعی ترک باعث کاهش ناحیه بارگذاری مؤثر پیچ و در نتیجه شکست ترد در ناحیه ضعیف با بیشترین طول ترک می‌شد [۲۳]. در بررسی فرایندهای تولید رزوه، کپارت به اثر نوع فرایند تولید بر مقاومت به خوردگی تحت تنش^۱ پیچ پرداختند. آنها دریافتند پیچ‌هایی که قبل از فرایند نورد استحکام‌دهی حرارتی شده‌اند نسبت به پیچ‌هایی که بعد از فرایند نورد استحکام‌دهی و یا توسط فرایند ماشین‌کاری تولید شدند، مقاومت به خوردگی تحت تنش (SCC) بالاتری را دارا می‌باشند [۲۴]. ایفرجان و همکاران به بررسی اثر ترتیب و نوع فرایندهای تولید مختلف بر روی خواص مکانیکی و مقاومت به خستگی پیچ AISI 4340 و همچنین به توسعه روش‌های آزمایشگاهی تمیز دادن بین آنها پرداختند. روش تولید پیچ‌های مورد بررسی به صورت ماشین‌کاری و نورد سرد با عملیات حرارتی قبل یا بعد از ساخت رزوه بود [۲۵]. مارسلو و همکاران به آنالیز خواص خستگی پیچ‌های با استحکام بالا در شرایط متالورژیکی متفاوت پرداختند. پیچ‌های M8 را در هفت گروه تقسیم کردند، سه گروه از فولاد AISI 4135 که عملیات حرارتی در پیچ‌ها بعد از نورد و در سه دمای بازپخت مختلف انجام شد. چهار گروه از فولاد SCM 435H نیز در شرایط یکسان تولید که در یک گروه پیچ‌ها بعد از عملیات حرارتی نورد شدند. آنالیز متالورژیکی، کشش، سختی و آزمون خستگی انجام گرفت. تمامی پیچ‌هایی که بعد از نورد عملیات حرارتی شدند مقاومت به خستگی یکسانی داشتند. گروهی که بعد از عملیات حرارتی نورد شد تقریباً ۹٪ مقاومت به خستگی بالاتری نسبت به سایر گروه‌ها داشت [۲۶]. مرسا به بررسی استحکام

^۱ Stress Crack Corrosion

خستگی پیچ دمپر یاتاقان موتور پرداخت. پیچ دمپر کپه موتور یک اتصال بحرانی است. او برای تخمین استحکام خستگی از روش S-N در نیروی همبندی ثابت و نیروهای بارگذاری مختلف استفاده کرد. به منظور مشاهده شکست ناشی از خستگی، تنش‌ها تا خرابی رزوه‌های پیچ کپه افزایش داده شد. برای اندازه‌گیری نیروی محوری پیچ‌ها نیز از روش اندازه‌گیری اولتراسونیک استفاده نمود [۲۷].

فصل ۲ فرایندهای ساخت پیچ و صحنه‌گذاری

امروزه یکی از مهم‌ترین چالش‌هایی که تکنولوژی ساخت و تولید در جهان با آن مواجه است، اطمینان از کیفیت قطعات تولیدی به همراه کاهش هزینه‌ها و افزایش کارایی می‌باشد. این مسئله به‌صورت تنگاتنگ با سطح دقت مورد نیاز، نوع و کیفیت مواد و سطح تکنولوژی مورد استفاده رابطه دارد. بی‌شک فرایند ساخت پیچ‌ها که در تمامی ماشین‌آلات مدرن دارای سوراخ‌های رزوه شده، پیچ و مهره می‌باشند، یکی از چالش‌های تکنولوژی ساخت و تولید است.

۲-۱- فرایند ساخت رزوه

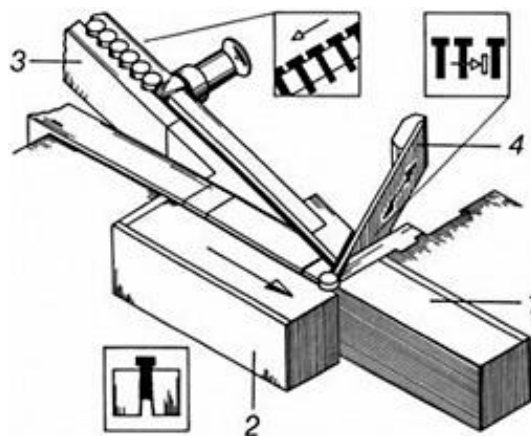
معمولاً رزوه‌ها به دو روش براده‌برداری یا ایجاد تغییر شکل پلاستیک تولید می‌شوند. در صنعت از هر دو روش استفاده می‌شود و هر یک از روش‌ها جایگاه خود را دارند. انتخاب هریک از روش‌ها به ابعاد، دقت نهایی مورد نیاز، خواص ماده، حجم تولید و ساختمان قطعه کار بستگی دارد. فرایند براده‌برداری را می‌توان به چند روش تقسیم کرد: تراشکاری، فرزکاری، سنگ‌زنی و قلاویز یا حدیده کاری که از هر

یک از آنها در موارد خاص استفاده می‌شود. با توجه به قابلیت‌ها و دقت ماشین‌های فوق می‌توان پیش-بینی کرد که پیچ تولیدی به کمک تراشکاری نسبت به فرزکاری و سنگ‌زنی دارای دقت و کیفیت کمتری است ولی به لحاظ هزینه بسیار ارزان‌تر از دو روش دیگر است. از فرایند تولید پیچ به روش براده‌برداری معمولاً برای پیچ‌های با قطر بزرگ، تعداد کم و اشکال رزوه غیر یکنواخت استفاده می‌شود. از فرزکاری و سنگ‌زنی برای قطعات با دقت بالا استفاده می‌شود. اگرچه دانش نورد پیچ اخیراً گسترش پیدا کرده است، اما از لحاظ تکنولوژی، جدید نمی‌باشد. افراد زیادی در صد سال اخیر بر روی این فرایند کار کرده‌اند که تعداد زیادی از آنها به اصول این فرایند پرداختند. با این حال این تکنولوژی تا حدود سال ۱۸۸۰ در صنایع عمومی مورد استفاده قرار نگرفت. استفاده از این روش در صنایع پیچ و مهره سازی به سال ۱۹۴۰ باز می‌گردد. در حقیقت بیش از ۹۰٪ پیچ‌ها تا قطر ۵۰ میلی‌متر (۲ اینچ) که به صورت تجاری مورد استفاده قرار می‌گیرند به روش نوردکاری (تغییر شکل پلاستیک) تولید می‌شوند. در شکل‌دهی رزوه قالب‌هایی که فرم رزوه مورد نظر بر روی آن ایجاد شده بر روی سطح قطعه با اعمال فشار و فروبری برجستگی‌ها شکل پروفیل رزوه را ایجاد و کامل می‌کنند. فرآیند نورد پیچ و دنده مارپیچ، در تولید با حجم بالا، بسیار سودمند است. به دلیل ضایعات کم، کیفیت سطح مطلوب، سختی سطحی مناسب، سرعت زیاد تولید و کاهش عملیات ثانویه (نظیر عملیات حرارتی و سنگ‌زنی) فرآیند نورد پیچ و دنده مارپیچ بسیار قابل اهمیت است. این فرآیند در روش‌های مختلف قابل انجام است. قالب به دلیل پیچیدگی ساخت، از هزینه زیادی برخوردار است. قالب‌های مورد استفاده بسته به کاربرد متفاوت بوده و می‌تواند استوانه‌ای یا تخت باشند. در این روش تولید قطعات به‌صورت دسته‌ای یا تولید انبوه انجام می‌شود و در تولید تکی یا تعداد محدود هزینه تولید را بالا می‌برد. در این روش هیچ‌گونه براده‌برداری از سطح قطعه صورت نگرفته و فقط توسط نورد، فرم کلی و نهایی ایجاد می‌شود؛ به همین علت ۱۵٪ تا ۲۰٪ در وزن ماده خام مصرفی صرفی‌جویی خواهد شد. مقدار یاد شده تنها در قسمت رزوه صدق می‌کند. در ابتدای امر باید تعداد قطعات، ابعاد، دقت و نوع پروفیل رزوه مورد بررسی قرار گیرد تا نوع ماشین و قالب مورد استفاده انتخاب شود. در ادامه دو فرایند عمومی نورد پیچ معرفی می‌شود.

۲-۱-۱-۲ نورد پیچ با قالب تخت

این ماشین دارای دو قالب تخت یا نسبتاً تخت می‌باشد که یک قالب ثابت بوده و دیگری در راستای موازی قالب اولی حرکت خطی دارد. قطعه کار توسط مکانیزم مکانیکی یا پنوماتیکی در بین این دو قالب قرار گرفته و با حرکت خطی اعمالی رزوه بر روی میله ایجاد می‌شود.

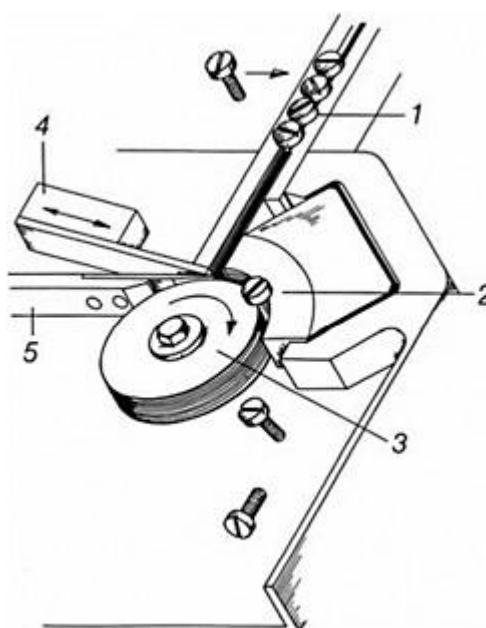
پروفیل رزوه به صورت شیارهایی با سطح مقطع مورد نظر در سه مرحله تحت زاویه بر روی قالب ایجاد می‌شوند. محاسبات و روش ایجاد پروفیل رزوه و آلیاژ قالب‌ها بسیار مهم است. به طور مثال اگر زاویه شیارهای ایجاد شده بر روی قالب مناسب و یا یکسان نباشد، یا با قطر، گام و پروفیل رزوه مورد نظر هم‌خوانی نداشته باشد پیچ از داخل قالب به سمت پایین یا بالا حرکت کرده و باعث خرابی پیچ می‌شود. سختی قالب‌ها بسته به گام و پروفیل رزوه بین ۵۸ تا ۶۳ راکول سی متفاوت است. در هر صورت قالب‌ها باید در مقابل خستگی، سایش و نیروی ناشی از اصطکاک دوام داشته باشند. یکی از مشکلات به وجود آمده در سطوح قالب خوردگی شیمیایی می‌باشد که در ۸۰٪ موارد از عدم انتخاب صحیح سیال روانکار ناشی می‌شود. انتخاب یک سیال روانکار می‌تواند تا ۳۰٪ عمر قالب‌ها را افزایش دهد. در شکل ۲-۱ نورد پیچ با قالب تخت نشان داده شده است.



شکل ۲-۱ نورد پیچ با قالب تخت [۲۸]

۲-۱-۲ نورد پیچ با قالب سیاره‌ای

همان‌طور که در شکل ۲-۲ مشخص است، ماشین نورد سیاره‌ای شامل یک قالب استوانه‌ای چرخان مرکزی با مرکز دوران ثابت و یک یا چند ایستگاه قالب مقعر نزدیک و خارج از قالب مرکزی می‌باشد. فاصله بین دو قالب طوری تنظیم می‌شود که قطعه کار همیشه در تماس با دو قالب باشد. ماشین قالب سیاره‌ای شبیه قالب‌های تخت، قادر به نورد بیشتر انواع پیچ‌های کوچک است. نرخ تولید این ماشین‌ها بیشتر از سایر ماشین‌ها است.

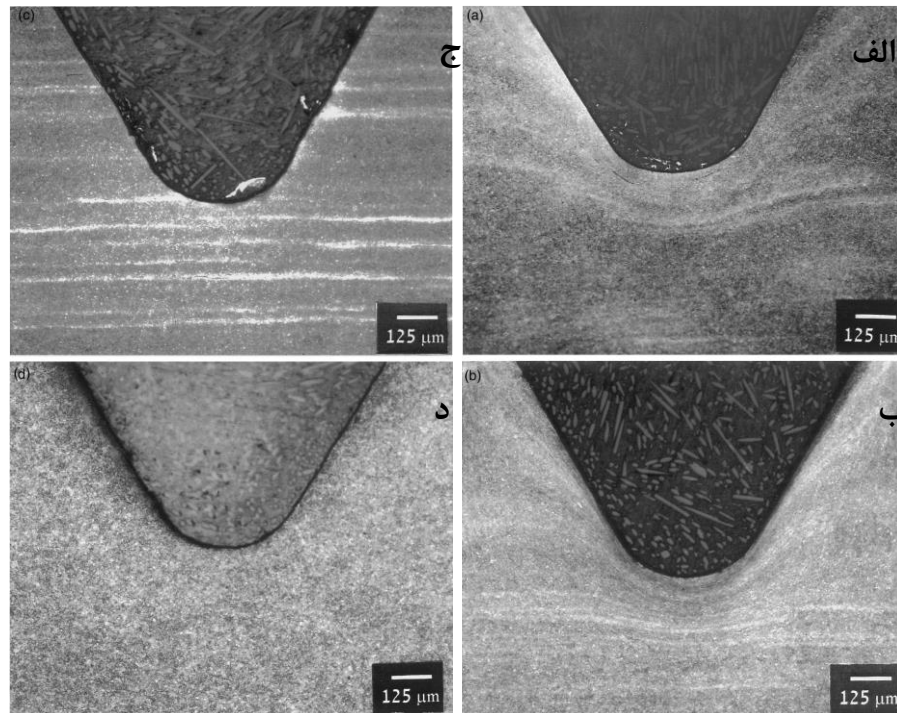


شکل ۲-۲ نورد پیچ با قالب سیاره‌ای [۲۸]

۲-۲-۲ مقایسه روش‌های تولید رزوه به طریق نوردکاری و براده‌برداری

نوردکاری سرد یکی از روش‌های ارزان فرایند شکل‌دهی می‌باشد که از طریق آن می‌توان عملیات رزوه‌زنی را با سرعت بالا و طول عمر ابزار خوب تولید نمود. تمامی رزوه‌ها را نمی‌توان به طریق نوردکاری تولید کرد. در اغلب موارد، موادی که برای نوردکاری مناسب هستند به خوبی تراشکاری نمی‌شوند و موادی که به خوبی تراشکاری می‌شوند برای نوردکاری مناسب نیستند. موادی برای عملیات نوردکاری مناسب هستند که دارای درصد ازدیاد طول نسبی بیش از ۱۲٪ باشند. در این محدوده ماده به صورت

ثابت تغییر شکل پلاستیک می یابد. نوع طراحی و کاربرد قطعه کار ممکن است طراح را ملزم به استفاده از جنس ماده به خصوص نماید. برای مثال از آنجا که چدن خاصیت سیلان ماده خوبی ندارد؛ بنابراین ماده مناسبی برای نوردکاری نبوده و برای ایجاد رزوه بر روی این نوع مواد بایستی از براده برداری استفاده نمود. از آنجا که قالب های مربوط به نوردکاری مقدار مشخصی از مواد را در خود جای می دهند، استفاده از ماده خام بیش از اندازه می تواند منجر به جریان اضافی مواد شده و در نتیجه باعث پر شدن بیش از حد قالب و آسیب دیدگی قالب و یا رزوه تولید شده شود. بنابراین قطر ماده خام باید به شدت کنترل شود. از نقطه نظر پرداخت سطح رزوه ها، روش رزوه زنی به طریق نوردکاری بهتر از براده برداری است. در برخی از قطعات مقدار زبری بر روی پیچ حک می شود که در روش نوردکاری رزوه می توان به سطح پرداخت $0.813 \mu\text{m}$ و در روش ماشین کاری $1/6 \mu\text{m}$ دست یافت. استحکام رزوه از دیگر عواملی است که باید مورد توجه قرار گیرد. در نوردکاری، ساختار دانه بندی ماده بریده نمی شود و همچنین به خاطر به وجود آمدن نیروهای فشاری در نوردکاری، رزوه های تولید شده دارای استحکامی حدود ۲۰٪ بیشتر از استحکام رزوه های تولید شده به روش براده برداری می باشند. در روش براده برداری، ساختار دانه بندی رزوه ها بریده خواهد شد که در نتیجه باعث تضعیف رزوه می شود (شکل ۲-۳).



شکل ۲-۳ خطوط جریان ماده در فرایند ماشینکاری و نورد پیچ (الف) نورد سرد قبل از عملیات حرارتی (ب) نورد سرد بعد از عملیات حرارتی (ج) ماشینکاری قبل از عملیات حرارتی (د) ماشینکاری بعد از عملیات حرارتی [۲۵]

در مواردی که نیاز به رزوه‌کاری در قسمت انتهایی قطعه کار باشد ترجیح داده می‌شود که از روش براده برداری برای ایجاد رزوه استفاده شود. زیرا در این حالت لبه برشی در زاویه مارپیچ بر روی خط مرکزی قطعه کار قرار گرفته و در نهایت به صورت مماسی در آن نقطه به اتمام می‌رسد.

۲-۳- فرایند ساخت گل پیچ

فرایند کله‌زنی یک فرایند تولید با سرعت زیاد است که به دو صورت گرم و سرد با ماشین‌های کله‌زنی انجام می‌شود. در فرایند کله‌زنی فلز در محدوده پلاستیک خود داخل قالب سیلان می‌کند. در کله‌زنی گرم برای افزایش قابلیت چکش‌خواری به فلز حرارت داده می‌شود. رایج‌ترین و شناخته‌شده‌ترین محصولات صنعت کله‌زنی سرد و گرم، پیچ، مهره، میخ پرچ، میخ و مشابه این‌ها هستند. مراحل ساخت به روش کله‌زنی برای پیچ در شکل ۲-۴ نشان داده شده است.



شکل ۲-۴ فرایند ساخت به روش کله‌زنی [۲۹]

از کله‌زنی سرد در تولید قطعات با تolerانس‌های دقیق و به وسیله پرس‌های سنگین و بزرگ استفاده می‌شود. مواد خام در این روش معمولاً میله‌گرد و یا کلاف است که در درجه حرارت محیط وارد ماشین می‌شود. بیشتر تولیدکنندگان روش سرد را ترجیح می‌دهند. در صورتی که تعداد سفارش کم بوده و یا اندازه درخواست شده خارج از محدودیت روش سرد و یا شکل قطعه به صورت غیر عادی باشد، از روش گرم استفاده می‌شود. همچنین در فرایند کله‌زنی به روش سرد به دلیل فشردگی کریستالی و تنش پسماند، استحکام خستگی افزایش می‌یابد. کله‌زنی گرم از لحاظ طراحی و کار مشابه کله‌زنی سرد می‌باشد و معمولاً برای قطعات با قطر بزرگ به کار می‌روند. می‌توان تمام طول میله را پیش‌گرم کرد و یا آن را به طول مورد نظر برش داد و تنها قسمتی که می‌بایستی شکل بگیرد، گرم کرد. سپس آنها را به‌طور دستی و یا اتوماتیک به داخل دستگاه هدایت کرد. درجه حرارتی اعمالی با توجه به نوع مواد و مقدار شکل‌پذیری آن تعیین می‌شود. میل‌گردهای فولادی تا رنگ قرمز روشن گرم می‌شوند. در صورتی که نیاز به گرم کردن تمام طول قطعه کار باشد کوره می‌بایستی به قدری بزرگ باشد تا چندین میل‌گرد را در یک زمان در خود جای دهد. میل‌گرد از یک طرف وارد کوره شده و قطعه حرارت دیده از طرف دیگر وارد ماشین می‌شود. وقتی تنها نیاز به گرم کردن انتهای قطعه باشد، کوره باید سوراخ‌ها و یا شکاف‌هایی در کنار خود داشته باشد تا قطعات در داخل این سوراخ‌ها و شکاف‌ها قرار گیرند و بعد از گرفتن گرمای کافی وارد ماشین شوند. در این روش مقدار ضایعات بسیار کم است که سبب کاهش

هزینه می‌شود. این روش نسبت به روش‌های ماشین‌کاری مقرون به‌صرفه‌تر است. در صورتی که خریدار و یا طراح نیاز به تolerانس‌های خاص یا گوشه‌های تیز داشته باشد، فرایند ماشین‌کاری و کله‌زنی تکمیل کننده یکدیگر هستند. بسیاری از قطعات دوتکه را می‌توان بعد از طراحی مجدد توسط این روش ساخت و باعث حذف مرحله جوشکاری سر به بدنه در برخی از محصولات شد. بزرگترین جنبه اقتصادی بودن روش کله‌زنی هنگامی شناخته می‌شود که تولید به تعداد زیاد مورد نیاز باشد. هزینه ابزارها و قالب‌های ضروری، زمان تنظیم کردن ماشین بر روی تعداد تولیدات تقسیم شده و واحد هزینه را کاهش می‌دهد. عملیات معمول در این ماشین‌ها شامل تغذیه اتوماتیک مفتول از یک کلاف، تنظیم به وسیله غلطک‌های تنظیم کننده، قطع آن به اندازه مناسب و انتقال به وسیله انگشت مکانیکی به داخل قالب است. هر قطعه به قدری داخل قالب می‌رود که مقداری از آن بیرون بماند. قسمت سر و آچارخور بیرونی توسط چکش با چند ضربه شکل گرفته و به‌صورت اتوماتیک بیرون پرتاب می‌شوند. تمام این عملیات با سرعت زیادی انجام می‌گیرد. برای اطمینان از عکس‌العمل مناسب پیچ‌هایی که تحت نیروهای کششی زیاد هستند، لازم است تا زیر گل پیچ نورد شده و با ایجاد تنش پسماند فشاری و ایجاد قوس از تمرکز تنش ممانعت به وجود آورده و استحکام پیچ را افزایش دهد.

۲-۴- مشخصات عملکردی پیچ

مقدار تنش کششی در پیچ‌های مهره‌دار^۱، پیچ‌ها^۲ و پیچ‌های دو سر رزوه^۳ که به‌صورت محوری به اعضای اتصالات وارد می‌شود بایستی به اندازه کافی بزرگ باشد تا بتواند اعضای اتصال را در تماس با یکدیگر نگه‌داشته و آنها را تحت فشار باقی بگذارد. کاهش میزان فشار در اتصالات باعث نشتی سیالات تحت فشار در پشت واشرهای فشاری، شل شدن اتصالات و کاهش عمر خستگی به دلیل صفر شدن بار اتصال، نیروی اعمالی مستقیماً به پیچ وارد می‌شود و مانند یک پیچ بدون نیروی همبندی اولیه عمل می‌کند.

^۱ Bolt

^۲ Screw

^۳ Stud

زمانی که از نیروی همبندی استفاده شود بخشی از بار اتصال محوری از طریق کاهش فشار اعضای اتصال جذب می‌شود. بنابراین افزایش میزان کشش پیچ در این حالت کمتر از مقداری است که اتصال بدون نیروی همبندی می‌باشد. بنابراین هرچه مقدار نیروی همبندی افزایش یابد، شرایط رفتار سیکلی بار به‌طور قابل ملاحظه‌ای کاهش یافته و باعث بهبود عمر خستگی می‌شود. مقاومت پیچ‌ها در بارهای کششی استاتیکی (تا ۱۰۰۰ مرتبه تغییر بار در طول عمر قطعه به‌عنوان بار استاتیکی محسوب می‌شود) با استحکام نهایی جنس پیچ متناسب است. مشروط بر آنکه چقرمگی^۱ جنس به قدری باشد که در نقاطی که به علت تمرکز تنش، مقدار تنش بیش از حد تسلیم جنس می‌شود، با تغییر شکل‌های کوچک بدون آنکه پیچ ترک بخورد، مقدار تنش در حد تسلیم باقی بماند.

برای طراحی و محاسبه پیچ‌ها، تنش تسلیم جزء مهم‌ترین عوامل است. در اتصالاتی مانند پیچ‌های استحکام بالای سرسیلندر و یاتاقان کپه موتور که تحت بارهای متناوب احتراق داخلی سیلندر هستند و در آنها کرنش تسلیم نزدیک به نقطه شکست می‌باشد، مقدار نیروی همبندی بایستی کمتر از مقدار نقطه تسلیم در نظر گرفته شود. محدوده نیروی همبندی معمولاً در محدوده ۷۵٪ تا ۹۰٪ استحکام تسلیم کششی، ۵۰٪ تا ۸۰٪ استحکام نهایی کششی و یا ۱۰۰٪ نقطه شروع تسلیم می‌باشد [۳۰]. زمانی که همبندی برای اولین بار انجام می‌شود، به‌خاطر ایجاد تنش لهیدگی اضافی زیر قسمت گل پیچ، وجود سطوح زبر و خشن و همچنین نبود سطوح تکیه‌گاهی مناسب، نقطه تسلیم موضعی تشکیل می‌شود. همچنین نیروها نمی‌توانند به‌طور مساوی بر روی رزوه در اتصال توزیع شوند و به همین خاطر نیز ممکن است باعث ایجاد تغییر شکل‌هایی در رزوه شوند. این شرایط می‌تواند منجر به کاهش مقدار نیروی همبندی اولیه مورد نظر شود. می‌توان مقدار کاهش نیروی همبندی اولیه را به هنگام طراحی یک اتصال به مقدار ۱۰٪ پیش‌بینی نمود. همبندی پیچ‌های موتور در ناحیه الاستیک یا پلاستیک انجام می‌شود. از دیدگاه عملی روش همبندی با کنترل زاویه الاستیک لزوماً درگیر پراکندگی نیروی محوری پیچ

^۱ Ductility

می‌باشد که معمولاً برای استفاده از آن به اپراتور ماهر به‌منظور کاهش پراکندگی‌ها نیاز است. همبندی با روش کنترل زاویه پلاستیک به وسعت برای بستن قطعات مهم با ابعاد متوسط یا بزرگ در موتورهای دیزل استفاده می‌شود. این روش در مقایسه با روش کنترل زاویه الاستیک قابلیت اعمال نیروی محوری با دقت بالایی را دارد اما مشکلات استفاده مجدد پیچ وجود خواهد داشت [۳]. در این روش احتمالاً پیچ پس از تغییرات ابعادی ناشی از گرم شدن و وجود تفاوت ضریب انبساط حرارتی و اعمال نیروهای اولیه ناشی احتراق، تغییر طول پلاستیک کمی خواهد داد که سبب کاهش نیروها در محدوده پایین‌تر از تنش تسلیم می‌شود. از آنجاکه اساساً به‌منظور تعمیر و نگهداری موتورهای دیزل نیاز به باز کردن موتورها در دوره‌های زمانی طراحی شده‌ای می‌باشد، معمولاً این پیچ‌ها در هر دوره به‌منظور استفاده مجدد اندازه‌گیری ابعادی می‌شوند که نباید از مقدار مجاز پیش‌بینی شده تغییر طول پلاستیک داده باشند. در غیر این صورت پیچ قابلیت استفاده مجدد نخواهد بود.

۲-۵- روش‌های صحنه‌گذاری کلاسه پیچ

پیچ‌ها در استانداردهای بین‌المللی بر اساس خواص مکانیکی رده‌بندی و صحنه‌گذاری می‌شوند. برای مشخص شدن ویژگی‌های مکانیکی و ترکیب شیمیایی پیچ‌های فولاد کربنی و آلیاژهای فولاد نیاز به انجام آزمون‌های تعریف شده‌ای بر اساس استاندارد DIN EN ISO 898-1 در محدوده کاری دمای ۱۰ تا ۳۵ درجه سانتی‌گراد می‌باشد که شامل؛ ۱-آزمون آنالیز شیمیایی ۲-آزمون کشش ۳-آزمون ساختار میکروسکوپی ۴-آزمون ساختار میکروسکوپی ۵-آزمون ترکیب شیمیایی (SEM) پوشش ۶-آزمون سختی سنجی ماکرو (قبل و بعد از عملیات حرارتی) ۷-آزمون سختی سنجی میکرو ۸-آزمون بار گواه ۹-آزمون کشش گوه ۱۰-آزمون ضربه می‌باشد.

برای کنترل پارامترهای ابعادی بر طبق استاندارد رزوه متریک ISO نیاز به اندازه‌گیرهای هندسی پروفیل رزوه، بررسی انطباقات پیچ با گنج‌های برو و نرو، آزمون هم محوری به منظور عدم ایجاد آسیب

دیدن پیچ و تغییر شکل به هنگام فرآیند همبندی و اندازه‌گیری ابعادی استاندارد طبق نقشه ساخت می‌باشد.

رده مقاومت مکانیکی پیچ‌ها با دو عدد که در کنار یکدیگر قرار دارند، نشان داده می‌شود که عدد اول مساوی ۰/۰۱ تنش نهایی جنس پیچ و عدد دوم ده برابر نسبت تنش تسلیم به تنش نهایی پیچ است. ردهای کلاس مقاومت تعریف شده در استاندارد DIN 267، ۳،۶، ۴،۶، ۴،۸، ۵،۶، ۵،۸، ۶،۸، ۸،۸، ۱۰،۹ و ۱۲/۹ می‌باشد. جنس پیچ‌ها در هر کلاس، روش ساخت (نورد سرد و تراشکاری) و قطر نامی پیچ‌های مختلف و آنالیز شیمیایی بر اساس استاندارد DIN 267 داده شده است. پیچ‌های کلاس ۸،۸ به بالا باید با عملیات حرارتی به سختی مربوطه در استاندارد برسند. برنامه آزمون‌های کامل صحنه‌گذاری^۱ پیچ‌های یاتاقان کپه و پیچ سرسیلندر در شکل ۲-۵ و شکل ۲-۶ نشان داده شده است. بر این اساس جهت صحنه‌گذاری کامل پیچ کپه یاتاقان و سرسیلندر می‌بایست سه مرحله آزمون صحنه‌گذاری انجام شود. مرحله اول آزمون‌ها براساس استاندارد طراحی پیچ کلاس ۱۲/۹ ارائه می‌شوند. در مرحله دوم به‌عنوان آزمون‌های وظیفه‌ای قطعه معرفی شده‌اند که عملکرد پیچ را در شرایط مشابه بارگذاری موتوری بررسی می‌کند، ولی آزمون‌ها عموماً به بررسی رفتار قطعه پیچ می‌پردازند. مرحله سوم آزمون‌ها به بررسی رفتار پیچ در کارکرد واقعی و در شرایط بارگذاری موتوری می‌پردازد. این تحقیق با استفاده از نتایج آزمون‌های مرحله اول (ابعادی، موادی) بیشتر به انجام آزمون‌های مرحله دوم (آزمون‌های وظیفه‌ای) می‌پردازد. سایر آزمون‌ها به‌خصوص آزمون‌های موتوری پس از تائید آزمون‌های اولیه توسط شرکت توسعه قوای محرکه دینا انجام و مورد تائید قرار گرفت.

^۱ Validation Plan



شکل ۲-۵ آزمون‌های صحنه‌گذاری پیچ سرسیلندر

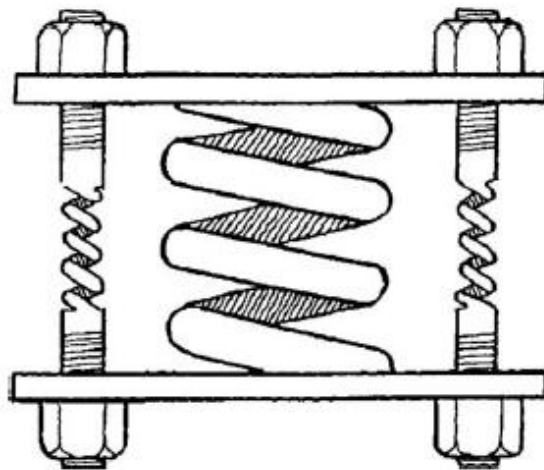


شکل ۲-۶ آزمونهای صحنه گذاری پیچ یاتاقان ثابت

۲-۶- روشهای صحنه گذاری عملکردی پیچ

انتخاب رده مقاومت مکانیکی مناسب برای هر اتصال بستگی به نیروهای وارده بر پیچ و طراحی ابعاد پیچ دارد. هنگامی که دو صفحه توسط یک پیچ به یکدیگر متصل می شوند، به دلیل خاصیت ارتجاعی اجسام، ضخامت صفحات به مقدار بسیار کوچکی کم و طول پیچ به مقدار بسیار کمی زیاد می شود. در حقیقت پیچ و صفحه مانند دو فنر سفت عمل می کنند که نیروی یکی فشرده و دیگری کشیده شده

است (شکل ۷-۲). اگر اتصال باز شود، قطعات به سرعت به ابعاد اولیه خود باز می‌گردند. این همان مقدار انرژی پتانسیل ذخیره شده در اتصال می‌باشد که نیروی همبندی را ایجاد می‌کند. از این خاصیت ارتجاعی برای کم کردن نیروهای دینامیکی در پیچ که خطرناک‌ترین نوع نیروی وارده بر آن می‌باشد، استفاده می‌شود. البته باید توجه داشت که برای مثال دو عضو از جنس St37 را نمی‌توان با پیچ ۱۲/۹ به یکدیگر متصل نمود مگر اینکه از واشر سخت شده با سطح بیشتر در زیر گل پیچ استفاده شود؛ زیرا با نیروی همبندی، فشار زیر سر پیچ از حد تحمل قطعه بالاتر شده و در نتیجه نیروی همبندی کم می‌شود.



شکل ۷-۲ تغییر شکل الاستیک پیچ و صفحات اتصال [۳۱]

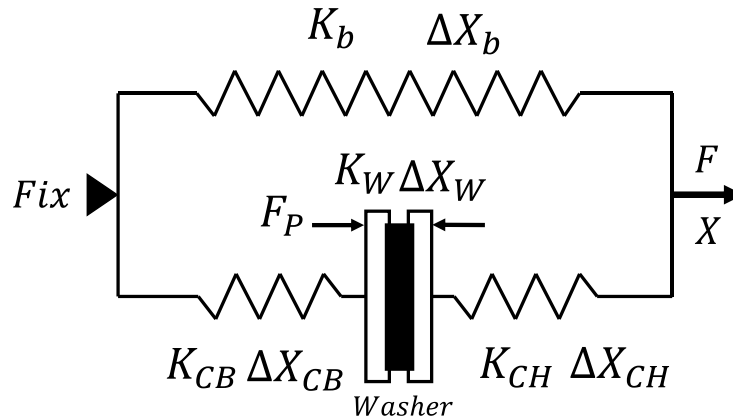
۲-۶-۱ محاسبه سفتی

اتصال پیچ‌های سرسیلندر را می‌توان به صورت تغییر شکل الاستیک فنر مدل نمود. مدل مکانیکی نشان داده در شکل ۸-۲ استحکام و سفتی^۱ اتصال سرسیلندر به همراه قطعات متصل را نشان می‌دهد. هر قطعه دارای رفتار الاستیک را می‌توان به صورت تغییر شکل و سفتی نشان داد. K_b ، K_{CB} ، K_{CH} و K_W به ترتیب سفتی پیچ، سفتی سرسیلندر، سفتی سیلندر و سفتی واشر بستار می‌باشند. بنابراین در صورتی که تنش‌های وارده بر آنها کمتر از تنش تسلیم باشد، طبق قانون هوک مقدار تغییر طول با تغییر نیرو

^۱ Stiffness

متناسب است و تغییر شکل الاستیک ناشی از نیروی همبندی F_p تمامی قطعات را می‌توان به صورت

ΔX_b ، ΔX_{CB} ، ΔX_{CH} و ΔX_W نشان داد.



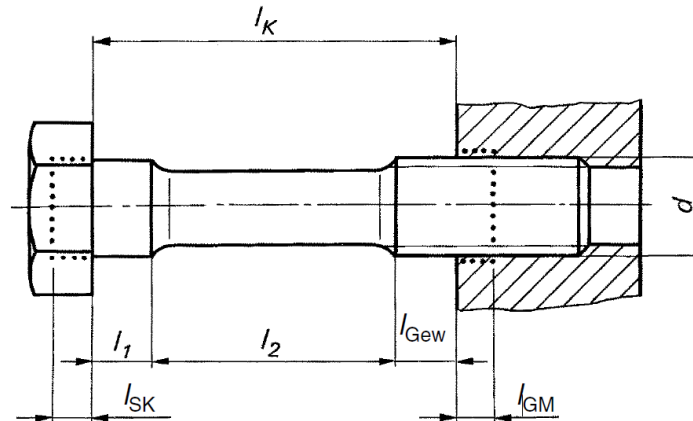
شکل ۲-۸ طرح‌واره روابط بین نیرو و تغییر شکل

قطعات به دلیل داشتن سفتی متفاوت، تغییر شکل متفاوتی خواهند داشت؛ بنابراین مقدار تغییر شکل هر قطعه وابسته به نیرو و سفتی آن می‌باشد که با استفاده از معادله ۱ می‌توان مقادیر سفتی برای هر قطعه را محاسبه کرد. ثابت سفتی پیچ را می‌توان به صورت دو فنر پشت سر هم برای قسمت رزوه‌دار و بدون رزوه با طول و مساحت سطح مقطع هر قسمت محاسبه نمود.

$$K = \frac{EA}{L}$$

۱

در این معادله K سفتی، E مدول یانگ، A مساحت سطح مقطع و L طول است. براساس این رابطه گل پیچ و مهره به صورت صلب در نظر گرفته می‌شوند که در واقعیت اینگونه نیست. نتایج نشان‌دهنده آن می‌باشد که مقادیر تغییر شکل الاستیک پیچ‌ها از مقادیر محاسبه‌شده بیشتر است. تجربه نشان می‌دهد که در پیچ‌های استاندارد، آن مقدار از سر پیچ و یا رزوه‌های داخل مهره که در فنریت مؤثر می‌باشند را می‌توان معادل استوانه‌ای به قطر اسمی پیچ و به طول 0.4 قطر اسمی آن فرض کرد. استاندارد VDI 2230 روابطی را به منظور محاسبه تغییر شکل اضافی با در نظر گرفتن گل پیچ، رزوه‌های درگیر و آزاد، اتصال با مهره یا به صورت ته بسته ارائه می‌دهد. پیچ‌ها دارای چندین قسمت مجزا می‌باشند که به آسانی می‌توان به صورت قسمت‌های استوانه‌ای با طول و سطح مقطع متفاوت جایگزین شوند (شکل ۲-۹).



شکل ۹-۲ طرحواره تشریح بخش‌های مختلف پیچ و مهره برای محاسبه سفتی [۱]

اگر E_b مدول یانگ پیچ باشد، می‌توان ازدیاد طول الاستیک f_i ناشی از نیروی خارجی را برای هر قسمت از پیچ را از معادله ۲ محاسبه نمود. معکوس سفتی را انعطاف‌پذیری الاستیک^۱ نامیده و آن را با δ_i نشان می‌دهند. در صورتی که چند فنر به حالت موازی با یکدیگر عمل کنند از معادله انعطاف‌پذیری الاستیک آنها استفاده می‌شود. زیرا انعطاف‌پذیری الاستیک مجموع فنرها با جمع انعطاف‌پذیری هریک از قسمت‌ها برابر است. از آنجاکه پیچ از مجموعه‌ای از قطعات استوانه‌ای به قطر و طول‌های مختلف تشکیل می‌شود، می‌توان آن را به صورت مجموعه‌ای از فنرهای مختلف که به صورت سری به یکدیگر متصل شده‌اند فرض نمود. برای هر قسمت استوانه‌ای پیچ مقدار انعطاف‌پذیری الاستیک محوری از معادله ۳ محاسبه می‌شود. بنابراین انعطاف‌پذیری کل پیچ δ_b برابر مجموع انعطاف‌پذیری قسمت‌های استوانه‌ای که به صورت سری در طول L_k و نواحی تغییر شکل اضافی قرار دارند، می‌باشد (معادله ۴).

$$f_i = \frac{L_i F}{E_b A_i} \quad ۲$$

$$\delta_i = \frac{1}{K} = \frac{f_i}{F} = \frac{L_i}{E_b A_i} \quad ۳$$

$$\delta_b = \frac{1}{E_b} \sum_i \frac{L_i}{A_i} \quad ۴$$

^۱ Elastic resilience

همان‌طور که بیان شد، تغییر شکل الاستیک گل پیچ δ_{SK} و تغییر شکل الاستیک رزوه‌های بلوک سیلندر δ_{GQ} که در خارج از طول درگیر L_k قرار دارند، سبب تغییر شکل‌های اضافی در پیچ می‌شوند. تغییر شکل رزوه‌ها δ_{GQ} شامل تغییر شکل ارتجاعی در رزوه‌های درگیر پیچ δ_G و تغییر شکل الاستیک رزوه‌های بلوک سیلندر δ_Q است (معادله ۵). تغییر شکل الاستیک δ_Q در نتیجه حرکت نسبی محوری بین رزوه‌های سوراخ بلوک سیلندر به دلیل خم شدن الاستیک و تغییر شکل فشار رزوه‌ها می‌باشد. در نتیجه سفتی K_{GQ} از معادله ۶ به دست می‌آید.

$$\delta_{GQ} = \delta_G + \delta_Q \quad ۵$$

$$\frac{1}{K_{GQ}} = \frac{1}{K_G} + \frac{1}{K_Q} \quad ۶$$

استاندارد VDI 2230 برای محاسبه سفتی رزوه‌های درگیر پیچ، سفتی رزوه‌ها در بلوک سیلندر و سفتی گل پیچ شش‌گوش به ترتیب معادلات ۷ تا ۹ را ارائه می‌دهد.

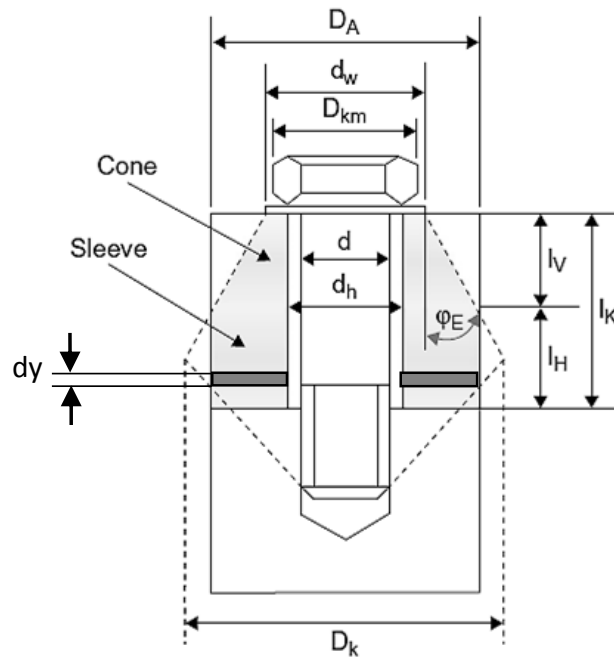
$$K_G = \frac{E_b A_{d3}}{0.5d} \quad ۷$$

$$K_Q = \frac{E_M A_N}{0.33d} \quad ۸$$

$$K_{SK} = \frac{E_b A_N}{0.5d} \quad ۹$$

۲-۶-۲ محاسبه سفتی قطعات اتصال

به‌منظور پی‌بردن به رفتار اتصال پس از وارد شدن بارهای خارجی نیاز به هر دو سفتی عضو سفت کننده (پیچ، پرچ و ...) و اعضای اتصال می‌باشد. سفتی قطعات اتصال به دلیل طبیعت نفوذ نیرو از گل پیچ و مهره پیچیده است. عمومی‌ترین رابطه توزیع تنش، روش مخروط فشار با زاویه نصف رأس φ_E می‌باشد. معمولاً از توزیع فشار در خارج از محدوده مخروط فشار صرف‌نظر می‌شود. هندسه توزیع فشار در شکل ۲-۱۰ برای اتصال پیچ سرسیلندر نشان داده شده است.



شکل ۲-۱۰ مدل محاسباتی مخروط فشار اتصال پیچ سرسیلندر [۳۲]

با انتگرال گیری از المان dy در جهت y می توان معادله ۱۱ را برای سفتی عضوهای اتصال، در صورتی که $d_w < D_A < D_K$ باشد، ارائه داد. برای زاویه φ_E مقادیر متفاوتی در کتب مرجع ذکر شده است اما اکثر آنها در ناحیه ۳۰ درجه است. بررسی های جدید حاکی از آن است زاویه این مخروط در اتصالات ثابت نمی باشد [۳۳]. در این پژوهش زاویه مخروط و سفتی اتصال بر اساس استاندارد VDI 2230 به ترتیب از معادلات ۱۰ و ۱۱ برای اتصال بدون مهره تخمین زده می شود که بیشترین خطا در محاسبه سفتی ۵٪ خواهد بود.

$$\tan \varphi_E = 0.348 + 0.013 \ln \left(\frac{l_k}{d_w} \right) + 0.193 \ln \left(\frac{D_A}{d_w} \right) \quad 10$$

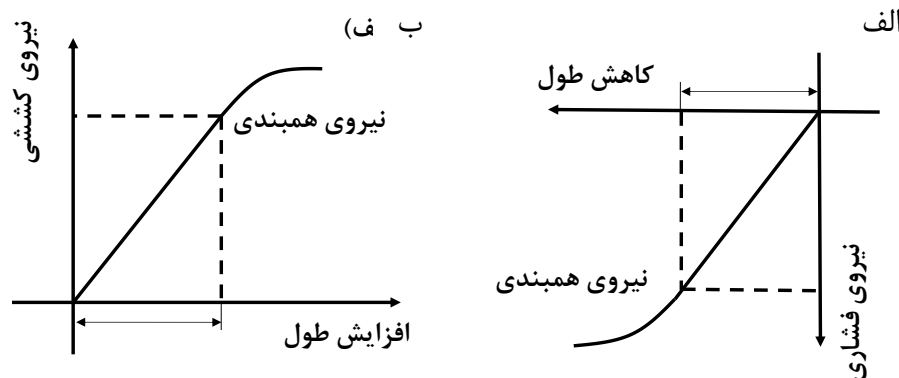
$$K_m = \frac{E_b \pi}{\frac{2}{w \cdot d_h \cdot \tan \varphi} \ln \left[\frac{(d_w + d_h)(D_A - d_h)}{(d_w - d_h)(D_A + d_h)} \right] + \frac{4}{D_A^2 - d_h^2} \left[l_k - \frac{(D_A - d_w)}{w \cdot \tan \varphi} \right]} \quad 11$$

w ثابت نوع اتصال ته بسته و d_h قطر سوراخ رزوه است. ثابت نوع اتصال برای اتصال مورد بررسی ۲ می باشد. گاهی بیش از دو عضو در ناحیه اتصال وجود دارند که انعطاف پذیری الاستیک اتصال برابر مجموع انعطاف پذیری تمام اعضا می باشد. اگر در اتصال از لایه بستار استفاده شده باشد، میزان سفتی

لایه بستر در ناحیه الاستیک چنان کم است که می‌توان از سفتی سایر اعضا نسبت به سفتی آن صرف‌نظر کرد و تنها از سفتی آن استفاده نمود.

۲-۶-۳ مثلث اتصال پیچ

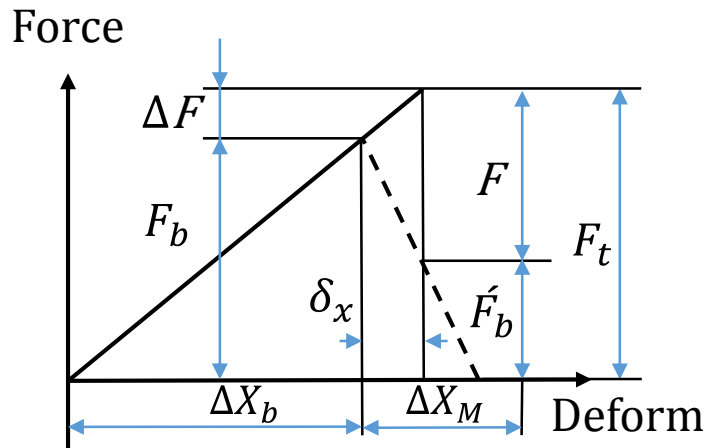
در حالت همبندی نیروی پیچ و صفحات اتصال مساوی است. در شکل ۲-۱۱ ارتباط نیرو با تغییر طول را برای پیچ و صفحات اتصال نشان داده شده است. با ترکیب شکل الف و ب می‌توان شکل مثلث اتصال پیچ را برای به دست آوردن معادلات پیچ تشکیل داد که با دانستن نیروی همبندی، تغییر طول پیچ و صفحات اتصال را به دست آورد.



شکل ۲-۱۱ ارتباط نیرو با تغییر طول، الف) صفحات اتصال ب) پیچ [۳۱]

در شکل ۲-۱۲ رابطه بین نیرو، تغییر شکل پیچ، تغییر شکل قطعات اتصال و اثر بار خارجی نشان داده شده است. نیروهای خارجی معمولاً از طریق صفحاتی که به یکدیگر بسته شده‌اند به اتصال وارد می‌شوند. برای ساده شدن معادلات مربوط فرض می‌شود که بار اعمالی وارده در جهت محور پیچ عمل می‌کند. در این حالت زمانی که بار خارجی ناشی از احتراق به سرسیلندر اعمال می‌شود پیچ کلیه بار مربوطه را تحمل کرده و طول آن به اندازه δ_x افزایش می‌یابد. نیروی کل پیچ F_t برابر مجموع نیروی خارجی F و نیروی همبندی باقی مانده $\bar{F}_p$ است. مقدار نقطه چین سمت راست نشان دهنده تغییرات ابعادی اعضا ΔX_M و خط سمت چپ نشان دهنده تغییر طول پیچ ΔX_b می‌باشد. اعمال نیروی خارجی سبب کاهش

نیروی همبندی و تغییر شکل‌های اضافی در اتصال می‌شود که از معادلات بیان شده می‌توان آن را استنباط کرد.



شکل ۲-۱۲ روابط بین نیروی استاتیکی و تغییر شکل پیچ و قطعات متصل [۱۰]

برای محاسبه یک اتصال پیچی می‌بایستی ابتدا نیروی مورد نیاز باقیمانده در صفحات پس از اعمال بار خارجی مشخص شود. نیروی باقیمانده در صفحات باید همواره بزرگتر از نیروی بار خارجی باشد تا اتصال به صورت مطلوب باقی بماند. این نیرو از بلند شدن صفحات از روی هم جلوگیری می‌کند و مانع از برهم خوردن آببندی اتصال سرسیلندر به بلوک سیلندر می‌شود.

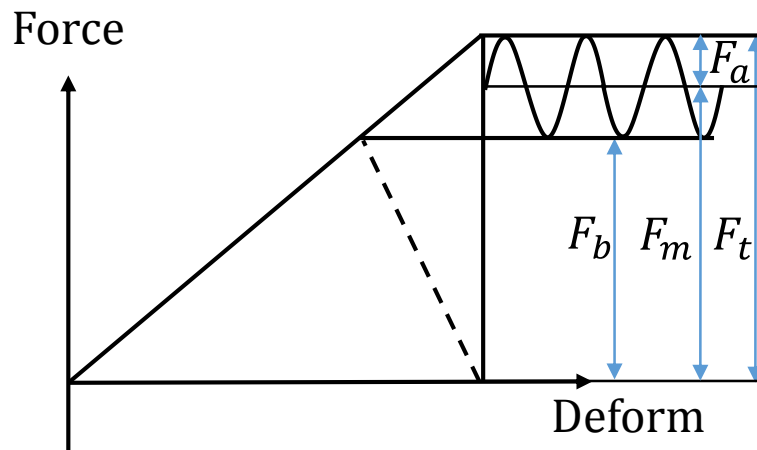
در تئوری کلاسیک به منظور مطالعه اثر نیروی خارجی F بر اتصالات پیچی با تعریف سفتی، معادلات ۱۲ تا ۱۴ برقرار می‌باشد. F_b نیروی پیچ، F_m نیروی عضوها و K سفتی اتصال می‌باشد.

$$F_t = KF + F_b \quad ۱۲$$

$$F_m = (1 - K)F - F_b \quad ۱۳$$

$$K = \frac{K_b}{K_b + K_m} \quad ۱۴$$

در اتصالاتی که نیروی خارجی متغیر باشد، اثر نیروی خارجی بر پیچ نیز متغیر بوده و نیروی دینامیکی وارد بر پیچ مطابق شکل ۲-۱۳ و معادلات ۱۵ و ۱۶ محاسبه می‌شود.



شکل ۲-۱۳ روابط بین نیرو دینامیکی و تغییر شکل پیچ و قطعات متصل

اگر نیروی خارجی بین دو نیروی F_b و F_t نوسان کند مقدار دامنه نیروی دینامیکی F_a در پیچ برابر است با:

$$F_a = \frac{F_t - F_b}{2} \quad ۱۵$$

و نیروی متوسط F_m در پیچ برابر است با:

$$F_m = \frac{F_b + F_t}{2} \quad ۱۶$$

۲-۶-۴ عملکرد پیچ در اثر اعمال حرارت

تمامی قطعات موتور در دمای محیط همبندی می شوند که به هنگام کار دمای آنها افزایش می یابد و تا پس از خاموش و سرد شدن در همان دما باقی می ماند. شاید یکی از مهم ترین عواملی که باعث تغییر نیروی همبندی می شود عامل حرارت باشد که سبب تغییر مدول یانگ می شود. از طرفی تفاوت ضریب انبساط حرارتی در پیچ و عضوها نیز باعث تغییر ابعاد قطعات و در نهایت کاهش و یا افزایش نیروی همبندی خواهد شد. تغییر دما ΔT سبب تغییر شکل خطی قطعات با ضریب انبساط حرارتی α_T و طول l می شود (معادله ۱۷).

$$f_T = \alpha_T \times l \times \Delta T \quad ۱۷$$

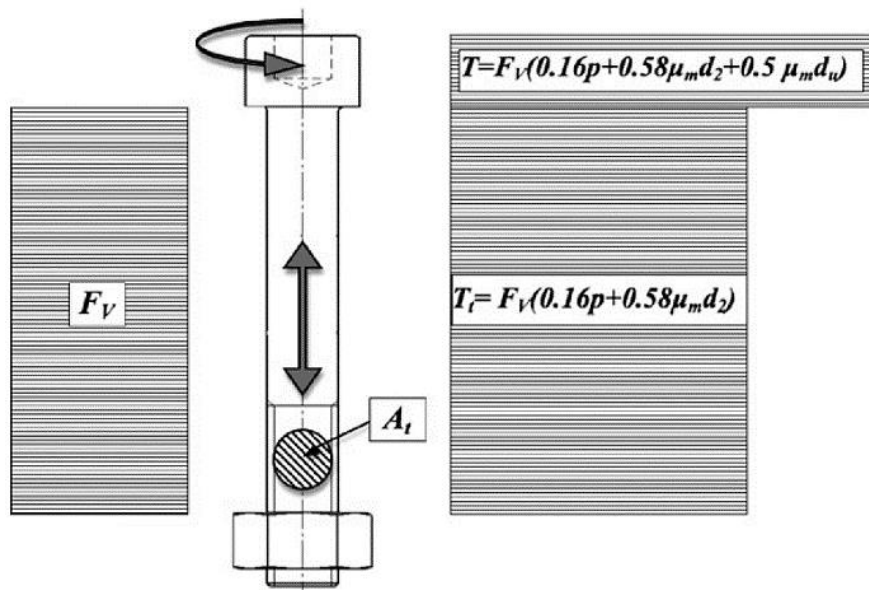
اگر پیچ نسبت به سایر قطعات اتصال حرارت بیشتری دریافت کند، در صورت یکسان بودن ضرایب انبساط حرارتی، نیروی همبندی به دلیل افزایش طول بیشتر، کاهش می‌یابد. این اتفاق زمانی که دمای قطعات یکسان باشد برای پیچ با ضریب انبساط حرارتی بالاتر نیز صادق است. اگر پیچ نسبت به قطعات اتصال تغییر طول کمتری بدهد سبب افزایش نیروی همبندی خواهد شد. از آنجاکه با افزایش حرارت مدول یانگ کاهش می‌یابد، نیروی همبندی با افزایش دما کاهش خواهد یافت حتی اگر ضریب انبساط حرارتی قطعات یکسان باشد. مقدار نیروی همبندی باقی مانده $\dot{F}_p$ بر اساس نیروی همبندی اولیه F_p در دمای اتاق و مدول یانگ در دمای محیط E و دمای کاری E_T بر اساس معادله ۱۸ بیان شده است [۱].

$$\dot{F}_p = \frac{F_p(\delta_b + \delta_M) - l_k(\alpha_b \times \Delta T_b - \alpha_M \times \Delta T_M)}{\delta_b \times \frac{E_b}{E_{bT}} + \delta_M \times \frac{E_M}{E_{MT}}} \quad ۱۸$$

با معادلات بیان شده می‌توان مقدار تغییرات نیروی همبندی پیچ در دمای کارکرد ۹۰ درجه سانتی‌گراد و تأثیر نیروی اعمالی توسط محفظه احتراق را محاسبه کرد.

۷-۲- محاسبه ضریب اصطکاک و نیروی همبندی

به‌منظور بررسی رفتار اتصالات سرسیلندر در قبل و حین کارکرد موتور در ابتدا نیاز به تعیین نیروی همبندی اعمالی، روابط بین گشتاور و نیروی همبندی و تشخیص ضریب اصطکاک در اتصالات می‌باشد. برای این منظور مقادیر گشتاور اعمالی برای محاسبه نیروی همبندی باید به‌صورت دقیق گزارش شود. گشتاور ورودی توسط آچار گشتاور-زاویه به سر پیچ و یا مهره اعمال خواهد شد که سبب ایجاد نیروی همبندی در پیچ می‌شود. اگر مقادیر اصطکاک به‌صورت صحیح پیش‌بینی نشود، می‌تواند سبب اعمال نیروی همبندی نامناسب و در نتیجه مشکلات بعدی در پیچ، بلوک سیلندر و عملکرد موتور شود (شکل ۲-۱۴).



شکل ۲-۱۴ طرح‌واره نیروهای محوری و پیچشی اعمالی به پیچ [۲]

معادله ۱۹ بین گشتاور و نیروی همبندی معمولاً با استفاده از ثابت k به‌عنوان ضریب گشتاور بیان می‌شود. بیکفورد [۳۱] مقادیری از ضریب گشتاور را برای اتصالات با جنس و کیفیت سطوح مختلف ارائه می‌دهد اما برای اعمال مقادیر یکنواخت و قابل اطمینان به‌خصوص برای اتصالات بحرانی، پراکندی بسیار زیاد است.

$$T = k \cdot F_b \cdot d \quad ۱۹$$

T گشتاور اعمالی ورودی، F_b نیروی همبندی، p گام و d قطر نامی پیچ است. روابط دقیق‌تر بین نیروی همبندی و گشتاور در معادله ۲۰ و ۲۱ بیان شده است [۱].

$$T = T_p(F_b, p) + T_t(F_b, \mu_t, d_2) + T_u(F_b, \mu_u, d_u) \quad ۲۰$$

$$T = F_b(0.16p + 0.58\mu_t + 0.5\mu_u d_u) \quad ۲۱$$

در این معادلات T_p گشتاور اعمالی برای لغزش بر روی سطح شیب‌دار، T_t گشتاور اعمالی برای غلبه بر ضریب اصطکاک رزوه‌ها، T_u گشتاور اعمالی برای غلبه بر ضریب اصطکاک زیر گل پیچ، d_2 قطر متوسط پیچ، d_u قطر زیر گل پیچ، μ_t ضریب اصطکاک رزوه‌ها و μ_u ضریب اصطکاک زیر گل پیچ می‌باشند. بر

استاندارد

اساس

DIN 946 به منظور محاسبه ضریب اصطکاک کلی، μ_u و μ_t را برابر فرض کرده و معادله ۲۱ را به صورت معادله ۲۲ بازنویسی می‌شود [۱، ۳۴].

$$\mu_m = \frac{T/F_b - 0.16p}{0.58d_2 + 0.5d_u} \quad 22$$

برای پارامترهای d_u ، p و d_2 از معادله ۲۳ خواهیم داشت:

$$d_2 = d - 0.6495p \quad 23$$

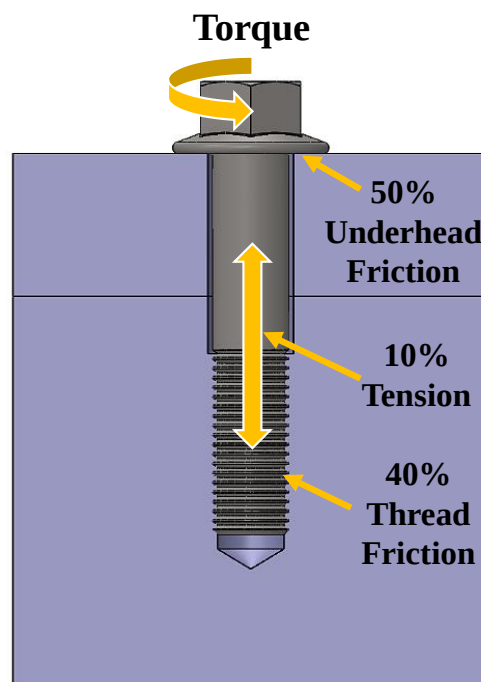
در نهایت پس از محاسبه ضریب اصطکاک با استفاده از واشر نیروسنج و آچار گشتاورسنج می‌توان معادله ۲۳ را برای برآوردی نیروی همبندی با استفاده از گشتاور اعمالی به صورت معادله ۲۴ بازنویسی کرد.

$$F_b = \frac{T}{\mu_m(0.58d_2 + 0.5d_u) + 0.16p} \quad 24$$

۲-۸- محاسبه تغییرات سرعت موج اولتراسونیک در فلزات تحت تنش

چندین روش برای اندازه‌گیری غیرمستقیم نیروی همبندی و تغییرات طول پیچ وجود دارد که شامل استفاده از آچار گشتاور-زاویه دیجیتالی [۴، ۶، ۳۴، ۳۵]، روش‌های تشخیص تغییرات طول اتصالات با استفاده از اندازه‌گیری کرنش و یا روش‌های پیچیده‌تر مانند اولتراسونیک [۳۶، ۳۷] می‌باشد. از روش کنترل زاویه در ناحیه الاستیک یا الاستیک-پلاستیک و برای طول بستن و نیروهای همبندی زیاد استفاده می‌شود. روش کنترل زاویه پلاستیک معمولاً برای همبندی برخی از قطعات خودرو به کار می‌رود. این روش در مقایسه با روش کنترل زاویه الاستیک قابلیت اعمال نیروی محوری با دقت بالاتری را دارد اما مشکلات استفاده مجدد پیچ‌ها وجود خواهد داشت. در همبندی قطعات مهم موتورهای دیزل با ابعاد متوسط یا بزرگ از روش کنترل زاویه الاستیک به وسعت استفاده می‌شود زیرا این پیچ‌ها اساساً

برای استفاده‌های مجدد در دوره‌های زمانی طولانی‌تر طراحی شده‌اند. از دیدگاه عملی روش کنترل زاویه الاستیک لزوماً دارای پراکندگی قابل قبولی از نیروی همبندی پیچ می‌باشد که با آموزش اپراتور و ارائه دستورالعمل، مقدار این پراکندگی‌ها را کاهش داد [۶]. با این حال گزارش‌ها در استفاده از آچار گشتاورسنج برای اندازه‌گیری کشش، خطای ذاتی فاجعه‌آمیزی تا بیشتر از ۵۰٪ را نشان داده‌اند. زمانی که پیچ‌های یکسان با گشتاور برابری بسته می‌شوند، اساساً کشش‌های یکسانی به پیچ‌ها اعمال نمی‌شود (شکل ۲-۱۵). این پدیده بیشتر به دلیل تغییرات ضریب اصطکاک در پیچ‌ها به وجود می‌آید. تنها ۱۰٪- ۱۵٪ از گشتاور اعمالی به کشش در پیچ تبدیل می‌شود. در تحقیق مشاهده شده است که اصطکاک می‌تواند سبب تحلیل رفتن ۹۰٪ گشتاور اعمالی که به‌طوری که ۵۰٪ آن صرف غلبه بر اصطکاک زیر گل پیچ و ۳۵٪ آن صرف غلبه بر اصطکاک بین رزوه‌ها می‌شود. به‌علاوه تفاوت ضریب اصطکاک از پیچ تا پیچ دیگر حتی با اعمال گشتاور دقیق عموماً سبب خطا تا ۵۰٪ می‌شود [۳۸].



شکل ۲-۱۵ طرح‌واره نیروهای محوری و پیچشی اعمالی به پیچ

این مقدار از خطا در نیروی همبندی سبب دشواری‌هایی در طراحی اتصالات پیچی به‌خصوص در اتصالات بحرانی می‌شود. روش کنترل زاویه از رابطه خطی بین زاویه دوران و نیروی محوری در ناحیه

الاستیک استفاده می کند. در ابتدا مقداری گشتاور تا خطی شدن نیروی محوری اعمال می شود. این ناحیه به عنوان نقطه Sung بیان می شود. استاندارد JIS^۱ مقدار گشتاور برای این نقطه را پیشنهاد می کند. تعیین مقدار مناسب گشتاور در سامانه قوای محرکه موتور عموماً فرایند پیچیده ای است و اغلب مواقع از روش ترکیبی همبندی با کنترل زاویه و گشتاور استفاده می شود. حدود ۴۰٪ نیروی همبندی با گشتاور و باقی مانده آن با کنترل زاویه اعمال می شود [۶]. با این حال پیدا کردن ناحیه الاستیک در آزمون تجربی دشوار می باشد. در تحقیقات از کرنش سنج به منظور اندازه گیری تنش بر اساس کرنش پیچ استفاده می شود [۲، ۹، ۳۹] که می بایست تغییراتی در ساختار پیچ داده شود و این خود باعث به وجود آمدن خطا در فرایند اندازه گیری می شود. علاوه بر این اضافه کردن کرنش سنج بر روی پیچ در حین همبندی واقعی دارای دشواری هایی می باشد.

امواج صوتی از نوع امواج کشسان هستند که می توانند هم از سیالات و هم از جامدات عبور کنند. بازه بسامد شنوایی گوش انسان از حدود ۲۰ Hz تا حدود ۲۰ KHz است ولی می توان امواج کشسان با بسامدهای تا حدود ۵۰۰ MHz و با طبیعت امواج صوتی ایجاد کرد. امواج کشسانی که دارای بسامد بالاتر از حد شنوایی هستند، امواج فراصوتی نامیده می شوند. امواجی که برای بازرسی های غیر مخرب به کار می روند، امواجی با بسامدهایی در حدود ۵/۰ MHz تا ۲۰ MHz است. امواج اولتراسونیک توسط مبدل های پیزو الکتریک تولید می شوند. بلور برخی از مواد از خود خواص پیزو الکتریک نشان می دهند به طوری که اگر یک ولتاژ به سطح های مقابل (دو طرف) بلور اعمال شود، ابعاد آن تغییر می کند. برعکس اگر همین بلور تحت تأثیر یک کشیدگی مکانیکی قرار گیرد، یک میدان الکتریکی متناسب با مقدار کشیدگی ایجاد می کند. هنگامی که ولتاژ متناوبی در بعد ضخامت به یک دیسک کوچک پیزو اعمال شود، دیسک منقبض و منبسط می شود و در محیط اطراف خود امواج تراکمی عمود بر دیسک منتشر می سازد. امواج فراصوتی به صورت یک سری پالس های فوق العاده کوتاه مدت ارسال می شوند. هرگاه یک

^۱ Japanese Industrial Standards

موج صوتی از نوع تراکم طولی به فصل مشترک دو محیط برسد، بخشی از موج برخورد کرده بازتاب می‌کند و بخشی دیگر از فصل مشترک می‌گذرد. در فصل مشترک یک فلز با هوا، بازتاب موج صوتی تقریباً ۱۰۰٪ است. برای کاهش ضریب بازتاب و فراهم آوردن این امکان که مقداری از انرژی صوتی از فصل مشترک بگذرد، باید از یک سیال مانند روغن به عنوان ماده واسطه یا جفت کننده^۱ استفاده شود. وقتی که یک پرتو موج تحت زاویه‌ای غیر از قائمه به فصل مشترک دو محیط برخورد کند، آن قسمت از پرتو موج که از فصل مشترک عبور می‌کند، شکسته خواهد شد. از آنجاکه بخشی از انرژی موج عبور کرده از فصل مشترک دو محیط به امواج برشی تبدیل می‌شود، ممکن است دو پرتو شکست از داخل فلز بگذرد. به هر حال یکی از مؤلفه‌های امواج شکسته از نوع تراکمی و مؤلفه دیگر از نوع برشی خواهد بود. در بازرسی‌های فراصوتی با وجود دو نوع موج، که با دو سرعت مختلف از ماده عبور می‌کنند، نتایج پیچیده‌ای به دست می‌آید. بنابراین زاویه برخورد به گونه‌ای تنظیم شود که از زاویه بحرانی شکست امواج تراکمی بزرگتر باشد. چندین نوع حسگر فرستنده اولتراسونیک مورد استفاده است، اما همه انواع آن تک‌بلور هستند. یک ولتاژ پله‌ای با قابلیت دوام کم، به بلور اعمال می‌شود و آن را در بسامد طبیعی خود به ارتعاش در می‌آورد. پس از قطع ولتاژ پله‌ای، لازم است ارتعاشات بلور هرچه زودتر مستهلک شوند. لذا برای کمک به این فرایند، معمولاً در پشت بلور یک ماده میرا کننده قرار می‌دهند. حسگر ممکن است از نوع عمودی یا مایل باشد.

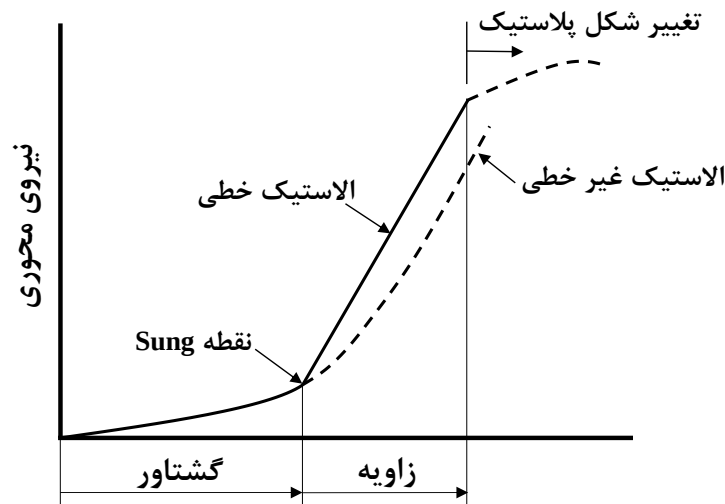
در روش اولتراسونیک اساس اندازه‌گیری تغییرات طول بر پایه زمان انتشار موج می‌باشد که قابلیت اندازه‌گیری آسان و با دقت بیشتر نیروی همبندی پیچ را دارد. برای تعیین نیروی همبندی در روش اولتراسونیک نیاز به طول اولیه پیچ قبل از بستن و جنس فلز (مدول یانگ و چگالی) یکسان است. آگاهی از این مقادیر بخصوص در پیچ‌هایی که قبلاً بسته شده‌اند و یا پیچ‌هایی که همانند یکدیگر نیستند دشوار می‌باشد. اگر در فرایند ساخت پیچ‌ها عملیات حرارتی انجام گرفته باشد، دانستن مقادیر دقیق

^۱ Couplant

مدول الاستیک دشوار می‌شود. ارزیابی‌های غیرمخرب اولتراسونیک برای تعیین ثابت‌های الاستیک بر روی کریستال فلزات با اندازه‌گیری سرعت موج اولتراسونیک‌های متفاوت (برای مثال اندازه‌گیری دو سرعت موج اولتراسونیک از سه مقادیر موج طولی، موج‌برشی و یا موج سطحی) انجام گرفته است. با این حال تلاشی برای اندازه‌گیری مستقیم سرعت موج اولتراسونیک با استفاده از آزمون Round-robin و یا اندازه‌گیری دقیق زمان انتشار موج انجام نمی‌گیرد زیرا حداکثر تغییرات زمان انتشار موج در نزدیکی نقطه تسلیم برابر ۱٪ می‌باشد [۳۸]. در عوض برای اندازه‌گیری تغییر طول پیچ از زمان انتشار موج اولتراسونیک در طول پیچ استفاده می‌شود. از آنجا که مقادیر اندازه‌گیری تغییر طول پیچ تحت کشش با اولتراسونیک شامل تغییر طول الاستیک پیچ به همراه خطای ناشی از کاهش زمان انتشار موج به دلیل تنش کششی در پیچ می‌باشد، در نتیجه سرعت موج اولتراسونیک در فلزات تحت تنش باید کالیبره شود.

۲-۸-۱ روابط بین تنش و سرعت موج اولتراسونیک

رابطه‌ی تنش و کرنش بر اساس تئوری الاستیک خطی با ثابت الاستیک مرتبه دوم به صورت یک خط بیان می‌شود. در این حالت سرعت ثابت موج اولتراسونیک را می‌توان با صرف نظر از تنش به عنوان تابعی از ثابت الاستیک مرتبه دو و چگالی بیان کرد. این در حالی است که بر اساس شکل ۲-۱۶ رابطه بین تنش و کرنش در محدوده الاستیک، غیرخطی می‌باشد.



شکل ۲-۱۶ رابطه بین نیروی محوری و گشتاور-دوران پیچ [۶]

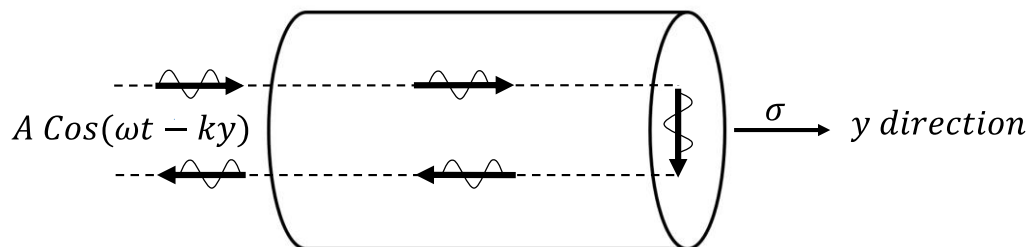
برای تشریح رابطه غیرخطی بین تنش و سرعت موج اولتراسونیک، تنش σ و کرنش ε با ثابت خطی الاستیک f و ثابت‌های الاستیک غیرخطی مرتبه سه g در معادله ۲۵ بیان می‌شود [۴۰].

$$\varepsilon_I = f_{IJ} \sigma_J + g_{IJK} \sigma_J \sigma_K$$

۲۵

$$I, J, K = 1, 2, \dots, 6$$

جهت استخراج رابطه بین تنش و سرعت موج اولتراسونیک بر اساس ثابت‌های الاستیک غیرخطی از معادله ۲۵ و تئوری موج الاستیک خطی از مرجع [۴۱] استفاده شد. حال می‌توان به بررسی انتشار موج اولتراسونیک طولی با دامنه A ، فرکانس ω و تعداد موج n در پیچ تحت بارگذاری محوری پایدار که در شکل ۲-۱۷ نشان داده شده است، پرداخت.



شکل ۲-۱۷ انتشار موج اولتراسونیک در پیچ تحت تنش محوری

بنابراین کرنش ε در جهت محوری با فرکانس موج اولتراسونیک از معادله ۲۶ و ۲۷ ارتباط دارد [۴۰].

$$\varepsilon_2 = A \cos(\omega t - ny) \times (f_{22} + 2g_{222}\sigma) \quad 26$$

$$\varepsilon_2 = \frac{n^2}{\rho\omega^2} A \cos(\omega t - ny) \quad 27$$

با برابر هم قرار دادن معادله ۲۶ و ۲۷ می‌توان سرعت موج اولتراسونیک C را از معادله ۲۸ محاسبه نمود.

$$C = \frac{\omega}{k} = [\rho(f_{22} + 2g_{222}\sigma)]^{-1/2} \quad 28$$

معادله ۲۸ برای ثابت الاستیک تا مرتبه سه در جهت محوری y بیان شده است. با دانستن مقادیر ثابت

g_{222} از آزمون تجربی می‌توان تغییرات سرعت صوت در تنش‌های مختلف را محاسبه کرد.

با تعریف پارامتر β که از تقسیم ثابت نسبت الاستیک غیرخطی و ثابت الاستیک خطی g_{222}/f_{22} بیان

می‌شود، معادله ۲۸ را می‌توان به صورت معادله ۲۹ بازنویسی کرد.

$$C = C_0 \frac{1}{\sqrt{1 + 2\beta\sigma}} \quad 29$$

زمانی که هیچ تنشی به پیچ اعمال نشده باشد سرعت طولی موج اولتراسونیک C_0 برابر $1/(\rho f_{22})^{1/2}$

است. با در نظر گرفتن کوچک بودن بسیار زیاد مقدار غیرخطی نسبت به مقدار خطی، معادله غیرخطی

۲۹ را می‌توان تا نقطه تسلیم به صورت معادله ساده خطی ۳۰ بیان نمود.

$$C = C_0(1 - 2\beta\sigma) \quad 30$$

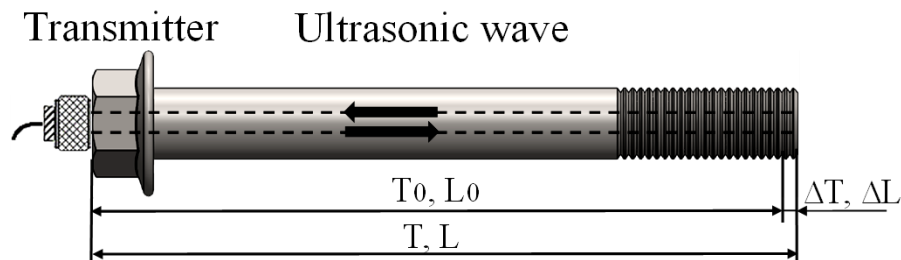
دقت اندازه‌گیری سرعت موج اولتراسونیک زمانی که از معادله ۳۰ برای محاسبه تنش محوری پیچ

استفاده می‌شود مهم است زیرا تغییرات در سرعت موج اولتراسونیک در محدوده تنش همبندی تا نقطه

تسلیم پیچ بسیار کوچک می‌باشد.

۲-۸-۲ اندازه گیری سرعت اولتراسونیک

نحوه اندازه گیری سرعت اولتراسونیک به روش بازتابی با حسگر عمودی در شکل ۲-۱۸ نشان داده شده است. این حسگر هم فرستنده و هم گیرنده است. موج اولتراسونیک که با مبدل های پیزو الکتریکی تولید می شود توسط ترانسدیوسر از بالای سطح سنگ خورده گل پیچ به داخل پیچ فرستاده و پس از برخورد به انتهای پیچ منعکس شده و توسط ترانسدیوسر دریافت و در نهایت زمان حد فاصل بین ارسال و دریافت به عنوان زمان انتشار موج ^۱TOF اندازه گیری می شود.



شکل ۲-۱۸ اندازه گیری زمان انتشار موج TOF

سرعت اولتراسونیک در طول انتشار L و زمان انتشار TOF از معادله ۳۱ محاسبه می شود.

$$C = \frac{2L}{t} \quad 31$$

از آنجا که طول انتشار در اثر اعمال تنش به علت بارگذاری تغییر می یابد، سرعت موج اولتراسونیک از معادله ۳۲ محاسبه می شود.

$$C = \frac{2(L_0 + \Delta L)}{t_0 + \Delta t} = C_0 + \Delta C \quad 32$$

t_0 و L_0 به ترتیب بیان کننده زمان اولیه انتشار موج و طول اولیه در هنگام عدم اعمال تنش می باشند. در حالی که Δt تغییرات زمان انتشار موج و ΔL تغییرات طول با اعمال تنش هستند. سرعت اولیه موج

^۱ Time of flight

اولتراسونیک C_0 از تقسیم L_0/t_0 محاسبه می شود. ΔC تغییرات سرعت حاصل از اعمال تنش محوری است.

معادله ۳۳ نرخ تغییرات سرعت اولتراسونیک با نادیده گرفتن ترم های با مرتبه دو و بالاتر از معادله ۳۲ به دست آمده است.

$$\frac{\Delta C}{C_0} = \frac{\Delta V}{V_0} + \frac{\Delta L}{L_0} \quad 33$$

در این معادله V سرعت ظاهری می باشد که به صورت $2L_0/t = C_0$ ، $V_0 = 2L_0/t_0 = C_0$ و $\Delta V = V - V_0$ تعریف می شود. با ترکیب معادله ۳۰ و ۳۳، پس از جایگذاری کرنش به جای $\Delta L/L_0$ رابطه ی مستقیمی از تنش و زمان انتشار موج TOF به دست می آید. بنابراین تنش می تواند به صورت مستقیم تنها با اندازه گیری TOF و دانستن ثابت های ماده (B, E, C_0) و با در نظر گرفتن طول اولیه L_0 تخمین زده شود. به منظور تائید $\Delta C/C_0$ مقادیر کرنش و TOF با معادله ۳۴ اندازه گیری شد. حال با دانستن تغییرات سرعت صوت نسبت به سرعت اولیه $\Delta C/C_0$ می توان تغییر طول ناشی از همبندی پیچ را از معادله ۳۴ محاسبه نمود. با جایگذاری کرنش به جای تغییر طول به طول اولیه پیچ $\Delta L/L_0$ معادله مستقیمی از تنش به دست می آید که امکان برآورد نیروی همبندی را امکان پذیر می سازد.

$$\Delta L = L_0 \left(\frac{\Delta C}{C_0} - \frac{\Delta V}{V_0} \right) = L_0 \left(\frac{\Delta C}{C_0} - \frac{2L_0}{tC_0} - 1 \right) \quad 34$$

۲-۸-۳ محاسبات خستگی

با معادلات بیان شده در بخش روش های صحه گذاری عملکردی پیچ می توان مقدار تغییرات نیروی همبندی پیچ در دمای کارکرد ۹۰ درجه سانتی گراد و تأثیر نیروی اعمالی توسط محفظه احتراق را محاسبه کرد که باعث اعمال بارهای خستگی به پیچ می شوند. معادلات تجربی زیادی برای بیان رابطه میان بازه تنش، تنش متوسط و عمر خستگی پیشنهاد شده اند که به ترتیب عبارت اند از معادله تصحیح شده گودمن، معادله سهمی شکل گربر و معادله سودربرگ:

$$\frac{\sigma_m}{\sigma_{FL}} + \frac{\sigma_m}{\sigma_{TS}} = 1 \quad ۳۵$$

$$\frac{\sigma_m}{\sigma_{FL}} + \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_{TS}}\right)^2 = 1 \quad ۳۶$$

$$\frac{\sigma_m}{\sigma_{FL}} + \frac{\sigma_m}{\sigma_y} = 1 \quad ۳۷$$

در این معادلات σ_{FL} استحکام خستگی است که در آزمون خستگی با تنش متوسط صفر محاسبه می‌شود، σ_{TS} استحکام کششی و σ_y استحکام تسلیم ماده است. از این روابط تجربی به دلیل نامطمئن بودنشان به طور محدود مورد استفاده قرار می‌گیرند.

استاندارد VDI 2230 برای پیچ‌های SI کلاس ۸،۸ و به بالا، معیاری برای طراحی استحکام خستگی در بارگذاری‌های محوری در پیچ‌های نورد شده قبل و بعد از عملیات حرارتی ارائه می‌دهد. این معیار، تغییرات مجاز تنش برای پیچ‌های نورد شده قبل از عملیات حرارتی را تنها بر اساس قطر نامی پیچ (معادله ۳۸) و برای پیچ‌های نورد شده بعد از عملیات حرارتی را بر اساس قطر نامی d و نسبت تنش اصلی σ_m به استحکام تسلیم σ_y ارائه می‌دهد (معادله ۳۹). معادله ۳۹ برای نسبت‌های تنش همبندی به استحکام تسلیم بین ۰٫۲ تا ۰٫۸ توصیه می‌شود.

$$\sigma_a = \frac{3}{4} \left[\frac{180}{d} + 52 \right] \quad ۳۸$$

$$\sigma_a = \frac{3}{4} \left[\frac{180}{d} + 52 \right] \left[2 - \frac{\sigma_m}{\sigma_y} \right] \quad ۳۹$$

در آزمون خستگی تعداد زیادی متغیر دخالت دارند که حتی اگر تمام نمونه‌های آزمایش یکسان و با دقت زیادی تهیه و به طور یکنواخت آماده شوند، نتایج آزمون خستگی ممکن است دارای پراکندگی قابل ملاحظه‌ای باشند. انجام آزمون خستگی در آزمایشگاه، معمولاً بر اساس شرایط بارگذاری یکنواخت استاندارد است و بنابراین برقراری ارتباط میان نتایج به دست آمده در آزمون خستگی در آزمایشگاه با آنچه که مستقیماً در هنگام کار اتفاق می‌افتد دشوار می‌باشد و لذا به کارگیری مستقیم نتایج آزمون

خستگی در طراحی مشکل است. بنابراین، در بعضی موارد لازم است با ابداع و انجام آزمایش خستگی بر روی نمونه تا شکست کامل ادامه یابد. برای این منظور طراحی آزمون خستگی بر اساس محدوده نیروهای همبندی و تغییرات نیرویی پیچ‌ها در محدوده نیروهای ناشی از احتراق داخلی موتور انجام شد.

فصل ۳ آزمون‌های تجربی و تحلیل عددی

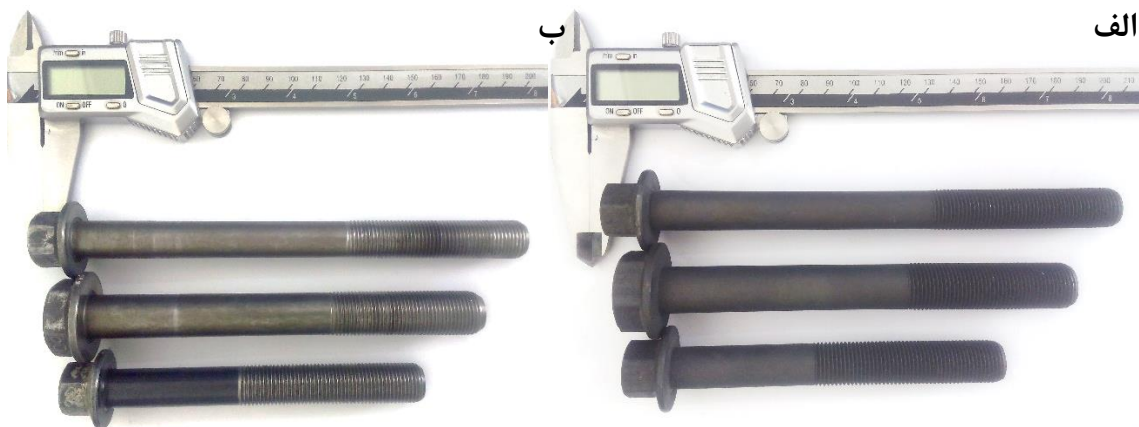
آزمون جزء اساسی هر فعالیت مهندسی می‌باشد. در بسیاری از مراحل فرایند پیچیده تولید مواد مهندسی، هنگام شکل دادن مواد و ساخت قطعه، همچنین همبندی قطعه‌ها برای ایجاد یک محصول مهندسی، بازرسی و آزمون باید صورت گیرد. نیاز به آزمون با پایان یافتن تولید به‌طور خودکار از بین نمی‌رود و لازم است محصول در طول عمر کاری‌اش مورد بازبینی و آزمون قرار گیرد تا تغییرات احتمالی ایجاد شده در آن، از قبیل خسارت‌ها مربوط به خوردگی و خستگی مشخص شود. آزمون‌ها را می‌توان به دو دسته آزمون‌های تعیین خواص مواد و ابعادی و آزمون‌های وظیفه‌ای و دوام تقسیم کرد. نیاز به انجام آزمون در بسیاری از قسمت‌های فرایند تولید از جمله بررسی قبول محصول از سوی قطعه‌ساز برای حصول اطمینان از عملکرد مورد نظر وجود دارد.

هدف از انجام آزمون‌ها در دو گروه پیچ‌های اصلی شرکت تولید کننده موتور دیزل و پیچ‌های ساخته شده، در ابتدا تأیید کلاس پیچ ساخته شده در کلاس ۱۲/۹ است. سپس بررسی رفتار عملکردی و وظیفه‌ای پیچ‌های ساخته شده شامل ارزیابی رفتار گشتاور-کشش برای ایجاد نیروی همبندی مشابه با پیچ‌های اصلی و همچنین بررسی استحکام خستگی در نیروهای کارکرد موتور می‌باشد.

۳-۱- روش‌های تجربی

۳-۱-۱ معرفی و دسته‌بندی پیچ‌ها

اتصال بستار به بلوک سیلندر در موتور مورد بررسی با پنج پیچ بلند و یک پیچ کوتاه $M16 \times 1.5$ انجام می‌پذیرد. همچنین در اتصال کپه یاتاقان از دو پیچ $M18 \times 1.5$ استفاده شد. تمامی پیچ‌های سرسیلندر ساخته شده دارای یک مشخصات هستند به جز اینکه پیچ‌های بلند دارای طول 175 mm ، پیچ کوتاه دارای طول 124 mm و طول پیچ یاتاقان کپه 154 mm است (شکل ۳-۱). پیچ‌های ساخته شده دارای پوشش فسفات روی و پیچ‌های اصلی دارای پوشش فسفات منگنز هستند.



شکل ۳-۱ معرفی و دسته‌بندی پیچ‌ها (الف) پیچ ساخته شده (ب) پیچ اصلی

در این تحقیق تمامی پیچ‌های کوتاه و بلند سرسیلندر در شرایط همبندی کامل سرسیلندر و همچنین پیچ‌های یاتاقان کپه موتور دیزل دریایی در دو گروه پیچ‌های ساخته شده و اصلی مورد مطالعه و مقایسه قرار گرفت. در جدول ۳-۱ دسته‌بندی و خصوصیات پیچ‌ها نشان داده شده است. تمامی پیچ‌های ساخته شده کارنکرده و تمامی پیچ‌های اصلی کارکرده هستند که از لحاظ سلامت ارزیابی و تأیید شدند.

جدول ۱-۳ دسته‌بندی پیچ‌ها مورد تحقیق

گروه	دسته	نام پیچ	جنس پیچ	تکنولوژی ساخت	تکنولوژی ساخت کلگی
پیچ بلند سرسیلندر (M16×1.5)	اصلی	CHL-O	A	عملیات حرارتی قبل از نورد	فورج گرم
	ساخته شده	CHL-M	B	عملیات حرارتی بعد از نورد	فورج سرد
پیچ کوتاه سرسیلندر (M16×1.5)	اصلی	CHS-O	A	عملیات حرارتی قبل از نورد	فورج گرم
	ساخته شده	CHS-M	B	عملیات حرارتی بعد از نورد	فورج سرد
پیچ یاتاقان کپه (M18×1.5)	اصلی	MBR-O	B	عملیات حرارتی قبل از نورد	فورج گرم
	ساخته شده	MBR-M	B	عملیات حرارتی بعد از نورد	فورج سرد

براساس جدول ۱-۳ در کلیه پیچ‌های ساخته شده فرایند عملیات حرارتی پس از نورد رزوه انجام شده است. این در حالی است که پیچ‌های اصلی عملیات حرارتی قبل از نورد رزوه شده‌اند. همچنین کلگی پیچ‌های ساخته شده با استفاده از تکنولوژی فورج سرد انجام شده است. علاوه بر این جنس پیچ‌های سرسیلندر ساخته شده مشابه پیچ‌های کپه یاتاقان ثابت در نظر گرفته شده است.

۲-۱-۳ آزمون‌های تعیین کلاسه پیچ

دامنه خواص قابل بررسی بسیار گسترده است. از میان این خواص می‌توان از استحکام نهایی کششی، فشاری و برشی در دمای محیط و دماهای دیگر، سختی، استحکام ضربه^۱، خواص تابع زمان مانند پدیده‌های خستگی و خزش، مقاومت به اکسایش، مقاومت به خوردگی و غیره نام برد. ارزیابی کامل تمام خواص برای هر قطعه بسیار پرهزینه و وقت‌گیر است و باید مشخص کرد که کدام خاصیت‌ها برای کاربرد

^۱ Impact strength

مواد مورد نظر حائز اهمیت هستند. برای اینکه بتوان به نتایج آزمون‌ها اعتماد کرد، انجام آزمون بر طبق روش‌های معین اهمیت دارد و به همین دلیل باید از روش‌های آزمون استاندارد استفاده کرد.

برای مشخص شدن ویژگی‌های مکانیکی و ترکیب شیمیایی پیچ‌های فولاد کربنی و آلیاژهای فولاد به‌منظور تائید کلاس ۱۲/۹ نیاز به انجام آزمون‌های تعریف شده‌ای براساس استاندارد DIN EN ISO 898-1 در محدوده دمای ۱۰ تا ۳۵ درجه سانتی‌گراد می‌باشد که شامل ۱-آزمون آنالیز شیمیایی ۲-آزمون کشش ۳- ساختار میکروسکوپی ۴- ساختار میکروسکوپی ۵- آزمون ترکیب شیمیایی پوشش (SEM) ۶- آزمون سختی سنجی ماکرو (قبل و بعد از عملیات حرارتی) ۷- آزمون سختی سنجی میکرو ۸- آزمون بار گواه ۹-آزمون کشش گوه ۱۰- آزمون ضربه است. تمامی آزمون‌ها در محدوده دامنه گواهینامه استاندارد ISO/IEC17025 انجام گرفت. در این استاندارد الزامات عمومی برای احراز صلاحیت جهت انجام آزمون و یا کالیبراسیون و نیز نمونه‌برداری تعیین می‌شود.

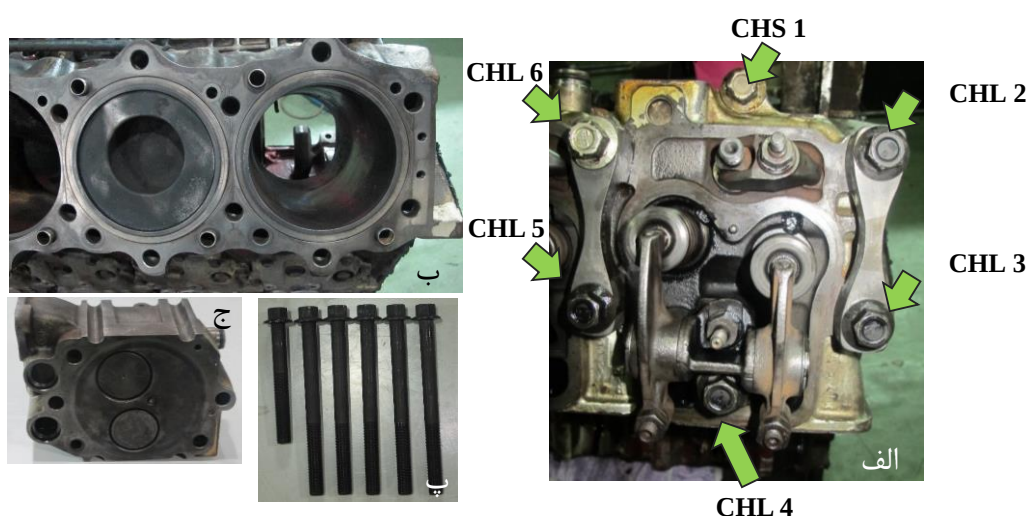
۳-۱-۳ آزمون اندازه‌گیری گشتاور معادل سفت کردن زاویه‌ای در شرایط همبندی واقعی

فرایند انجام آزمون همبندی در سه مرحله مختلف انجام گرفت. روش همبندی پیچ‌ها بر اساس دستورالعمل تولیدکننده موتور، مطابق جدول ۲-۳ می‌باشد.

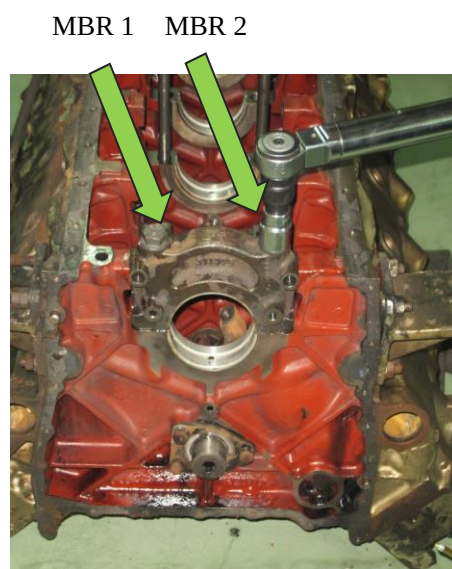
جدول ۲-۳ روش همبندی پیچ‌های کوتاه و بلند بستار و پیچ یاتاقان کپه

ردیف	ترتیب بستن	CHL	CHS	MBR
۱	گشتاور (N.m)	۱۰	۱۰	۱۰۰
۲	گشتاور (N.m)	۸۰	۸۰	-
۳	گشتاور (N.m)	۱۶۰	۱۶۰	-
۴	گشتاور (N.m)	۲۵۰	۲۵۰	-
۵	زاویه (درجه)	۹۰	۶۰	۴۵
۶	زاویه (درجه)	۹۰	۶۰	۴۵

بر این اساس هر پیچ در یک یا چند مرحله اول با آچار نیروسنج تا گشتاور مشخصی همبندی شده و سپس فرایند همبندی با اعمال دو زاویه، نهایی می‌شود. در آزمون اول، همبندی پیچ‌های سرسیلندر و یاتاقان کپه بر روی بلوک سیلندر در شرایط اصلی انجام شد. گشتاورهای اعمالی در ۴ مرحله اول با استفاده از آچار گشتاورسنج ثبت شد. همچنین گشتاور معادل زاویه همبندی برای مراحل ۵ و ۶ نیز توسط آچار گشتاور-زاویه اندازه‌گیری شد. پیچ‌های کوتاه و بلند سرسیلندر و پیچ یاتاقان کپه مطابق شکل ۲-۳ و شکل ۳-۳ بر روی بلوک سیلندر همبندی شدند.



شکل ۲-۳ همبندی مجموعه سیلندر (الف) همبندی کامل (ب) بلوک سیلندر (پ) پیچ‌های کوتاه و بلند سرسیلندر (ج) سرسیلندر

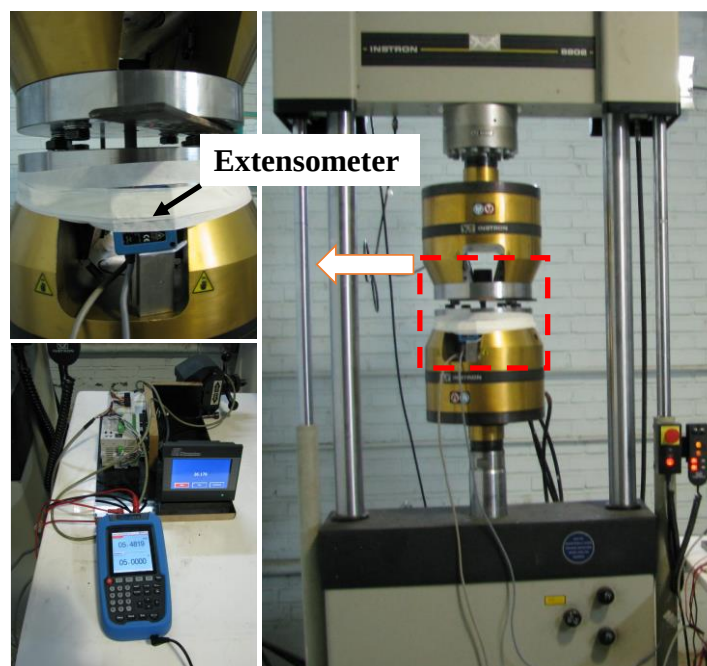


شکل ۳-۳ همبندی یاتاقان کپه

پیچ سرسیلندر شماره ۱ پیچ کوتاه و سایر پیچ‌ها بلند می‌باشند. فرایند همبندی پیچ‌های سرسیلندر به صورت حلزونی و به ترتیب در هر مرحله از فرایند بستن از پیچ شماره ۱، ۴، ۵، ۶، ۲ و ۳ و در فرایند باز کردن از پیچ شماره ۲، ۳، ۵، ۶، ۱ و ۴ است. در این آزمون، تکرار آزمون برای تمامی پیچ‌ها ساخته شده در سه مرتبه و برای پیچ‌های اصلی یک مرتبه انجام شد. به منظور کنترل شرایط اصطکاکی تمامی پیچ‌ها قبل از همبندی با بنزین شسته، باد گرفته و با روغن ایرانول 20W50 روانکاری شدند. همچنین سوراخ رزوه سیلندر نیز تمیز شد.

۳-۱-۴ آزمون کالیبراسیون نیروسنج

آزمون کشش پیچ و کالیبراسیون و اشر نیروسنج به همراه اکستنسومتر^۱ لیزری بر روی دستگاه کشش INSTRON 8808 انجام گرفت (شکل ۳-۴). آزمون کشش نیز به طور هم زمان به منظور تعیین محدوده رفتار الاستیک-پلاستیک پیچ انجام شد.



شکل ۳-۴ آزمون کشش و کالیبراسیون و اشر نیروسنج به همراه اکستنسومتر لیزری

¹ Extensometer

۳-۱-۵ آزمون اندازه‌گیری گشتاور معادل و نیروی همبندی

در آزمون دوم همان‌طور که در شکل ۳-۵ نشان داده شده است به‌منظور اندازه‌گیری نیروی همبندی، پیچ‌ها به همراه واشر نیروسنج بر روی بلوک سیلندر بسته شدند. تمامی فرایندهای آماده‌سازی پیچ و رزوه تکرار شد. در این مرحله نیروی پیچ‌ها و گشتاور همبندی و باز کردن اندازه‌گیری شد. این فرایند برای دو پیچ اصلی و دو پیچ ساخته شده یاتاقان کپه در یک مرحله انجام شد. دو پیچ بلند و دو پیچ کوتاه اصلی و ساخته شده سرسیلندر نیز بر روی واشر نیروسنج همبندی شدند و نیروی پیچ و گشتاور بستن و باز کردن آنها در یک مرحله اندازه‌گیری شد. پیچ‌های ساخته شده فاقد پوشش فسفات روی بودند زیرا در آخرین آزمون مرحله اول پوشش آنها حذف شد.



شکل ۳-۵ اندازه‌گیری نیروهای همبندی پیچ‌های الف) کوتاه سرسیلندر ب) بلند سرسیلندر ج) یاتاقان کپه

۳-۱-۶ آزمون اندازه‌گیری همزمان نیروی همبندی پیچ و تغییر طول پیچ با استفاده از روش اولتراسونیک

در آزمون سوم، اندازه‌گیری نیروی همبندی، گشتاور و تغییرات طول پیچ به ترتیب با استفاده از آچار نیروسنج و آچار گشتاور-زاویه دیجیتال، و اشتر نیروسنج و دستگاه اولتراسونیک انجام شد. تمامی فرایندهای آماده‌سازی پیچ و رزوه بلوک سیلندر تکرار شد. در این آزمون دو پیچ اصلی و دو پیچ ساخته شده یاتاقان کپه که گل پیچ آنها به‌منظور تماس کامل حسگر اولتراسونیک و عدم وجود هوا برای اندازه‌گیری تغییرات طول پیچ با دستگاه اولتراسونیک، سنگ‌زنی شده بود، به همراه و اشتر نیروسنج بر روی بلوک سیلندر همبندی شد. قبل از اندازه‌گیری اولتراسونیک سطح بالای گل پیچ به روغن مخصوص برای تماس بهتر حسگر آغشته می‌شد. در طول فرایند همبندی، تغییرات طول پیچ توسط دستگاه اولتراسونیک و مقادیر گشتاور و نیروی همبندی اعمالی به ترتیب مراحل جدول ۳-۲ اندازه‌گیری شد. تکرار آزمون برای پیچ اصلی یاتاقان کپه یک مرتبه و برای پیچ ساخته شده سه مرتبه انجام شد. تمام این فرایندها برای پیچ‌های کوتاه و بلند سرسیلندر نیز صورت گرفت. تمام پیچ‌های ساخته شده در این مرحله کار نکرده بودند که در مرحله نهایی همبندی به‌منظور بررسی تأثیر پوشش بر روی نیروی همبندی، پوشش فسفات روی آن با برس سیمی حذف شد. فرایند اندازه‌گیری تغییرات طول پیچ ناشی از نیروی همبندی برای پیچ بلند سرسیلندر و پیچ سنگ خورده همبندی شده همراه و اشتر نیروسنج در شکل ۳-۶ نشان داده شده است. در تمامی مراحل آزمون هر پیچ قبل و بعد از همبندی با کولیس دیجیتال اندازه‌گیری و تغییر شکل پلاستیک آنها ثبت شد. همچنین پس از هر مرحله همبندی، پیچ با دستگاه اولتراسونیک اندازه‌گیری مجدد شد تا از صحت کالیبراسیون و عدم ایجاد تنش پس‌ماند در پیچ اطمینان حاصل شود.



شکل ۳-۶ اندازه‌گیری زمان انتشار موج اولتراسونیک به همراه وایر نیروسنج (الف) پیچ بلند سرسیلندر (ب) پیچ یاتاقان کپه

در این آزمون به منظور اندازه‌گیری تغییرات طول پیچ از دستگاه اندازه‌گیری سرعت موج اولتراسونیک با نام تجاری OLUMPUS-25DL PLUS با دقت 0.01 mm استفاده شد. فرایند اندازه‌گیری این دستگاه با روش Pulse-echo و با موج طولی انجام گرفت. به منظور افزایش دقت، طول پیچ‌ها قبل و بعد همبندی با استفاده از کولیس اندازه‌گیری شده است. دستگاه اولتراسونیک قبل از اندازه‌گیری با استفاده از پیچ با طول مشخص و سطح سنگ خورده کالیبره شد. از ترانسدمتر اولتراسونیک با فرکانس در محدوده $2.5\text{--}30 \text{ MHz}$ در بالای سطح سنگ‌زنی پیچ برای اندازه‌گیری زمان انتشار موج TOF استفاده شد. شکل ۳-۶ الف چگونگی اندازه‌گیری تغییر طول پیچ با روش اولتراسونیک را نشان می‌دهد.

۳-۱-۷ آزمون خستگی

از آنجا که پیچ‌های ساخته شده دارای فرایند ساخت متفاوتی نسبت به پیچ‌های اصلی می‌باشند، می‌بایست تأثیر فرایند ساخت پیچ بر عمر خستگی نهایی این پیچ‌ها مورد بررسی قرار گیرند. پیچ‌های ساخته شده می‌بایست به گونه‌ای باشد که در شرایط کارکرد واقعی موتور دارای عمر بی‌نهایت باشند. جهت نیل به این هدف دو رویکرد برای پیچ‌های سرسیلندر و پیچ‌های کپه یاتاقان ثابت در نظر گرفته شد. در پیچ‌های کپه یاتاقان ثابت، از آنجا که پیچ‌های اصلی و ساخته شده همجنس می‌باشند و همچنین محاسبه تعیین بارهای نوسانی در موتور دیزل پرسرعت دریایی امکان‌پذیر نبود، معیار عمر خستگی از

روی پیچ‌های اصلی به‌دست می‌آید. به‌گونه‌ای که عمر پیچ‌ها در شرایط یکسان بارگذاری مقایسه می‌شوند تا اثر تکنولوژی‌های ساخت رزوه پیچ و کلگی مورد مطالعه قرار گیرند. در پیچ‌های سرسیلندر، از آنجا که جنس پیچ اصلی و ساخته شده متفاوت است، نیروهای بارگذاری دینامیکی و استاتیکی پیچ به‌صورت روابط تحلیلی و عددی به‌دست می‌آید. سپس پیچ ساخته شده در این شرایط بارگذاری مورد آزمون خستگی پرچرخه قرار گرفت. آزمون خستگی با استفاده از دستگاه کشش INSTRON 8808 با ظرفیت ۲۵ تن انجام شد. به دلیل محدود بودن فضای فک دستگاه آزمون خستگی تنها برای پیچ بلند سرسیلندر انجام شد. آزمون خستگی پیچ یاتاقان کپه در شکل ۷-۳ نشان داده شده است.



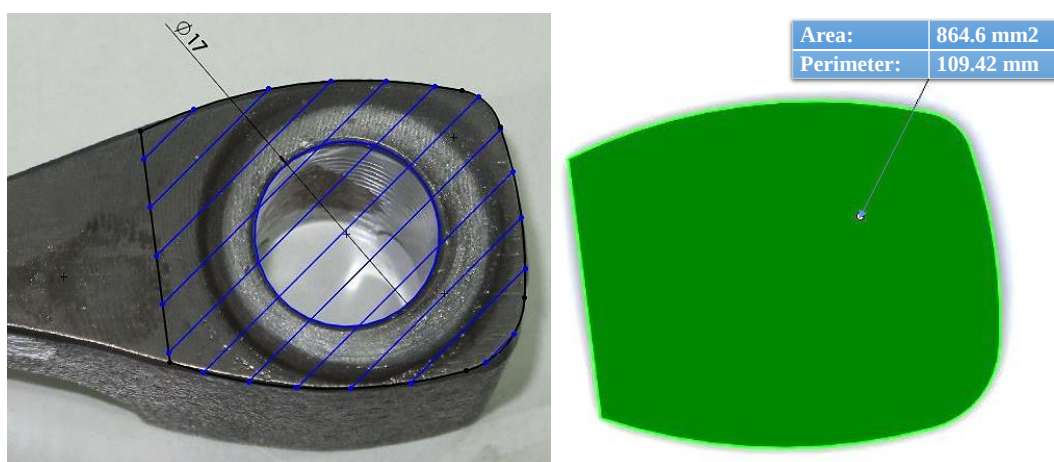
شکل ۷-۳ آزمون خستگی پیچ یاتاقان کپه

۳-۲- شبیه‌سازی عددی

در این بخش از نرم‌افزار ABAQUS 6.14 برای انجام شبیه‌سازی‌های مورد نظر استفاده شده است. این شبیه‌سازی به‌منظور شناخت بهتر رفتار پیچ و تأثیر هر یک از عوامل حرارت و نیروی خارجی بر نیروی همبندی می‌باشد. در نهایت مقادیر نیروهای نوسانی برای عمر خستگی برآورد و با مقادیر نیروهای محاسبه شده تحلیلی مقایسه خواهد شد.

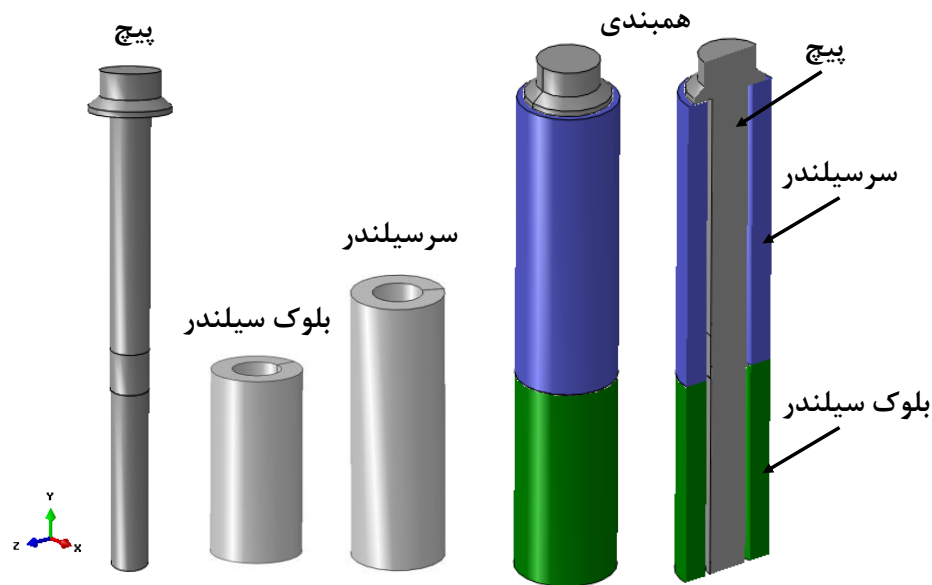
۳-۲-۱ تعریف مدل هندسی و خواص ماده

در این بخش مدل سه بعدی ساده شده همبندی شامل پیچ، سرسیلندر و بلوک سیلندر انجام شد. مدل تمامی قطعات از نوع شکل پذیر است. برای انجام شبیه سازی از پیچ بلند $M16 \times 1.5$ با طول 175 mm و استوانه تخمین زده شده برای مخروط فشار با قطر داخلی 17 mm و قطر خارجی 35 mm استفاده شد. اندازه قطر داخلی و محاسبه قطر خارجی مؤثر در شکل ۳-۸ نشان داده شده است.



شکل ۳-۸ محاسبه قطر خارجی مؤثر زیر گل پیچ

مرجع [۹] در بررسی رفتار یک اتصال پیچی ساده تحت اثر بارگذاری کششی جداکننده با استفاده از روش‌های محاسبات عددی سنتی، روش المان محدود نشان داد که برخی از جزئیات برای اطمینان از نتایج مدل سازی مانند مدل کردن برهم کنش رزوها نیاز نمی باشد. بنابراین به جای مدل کردن رزوها از سطح مقطع تحت تنش پیچ استفاده شد. شکل ۳-۹ هر یک از اجزای مدل ایجاد شده را نشان می دهد. سپس تمامی مدل های هندسی که به صورت جداگانه ایجاد شده اند، باید در موقعیت مناسبی نسبت به هم قرار گیرند تا هندسه کلی شکل یابد.

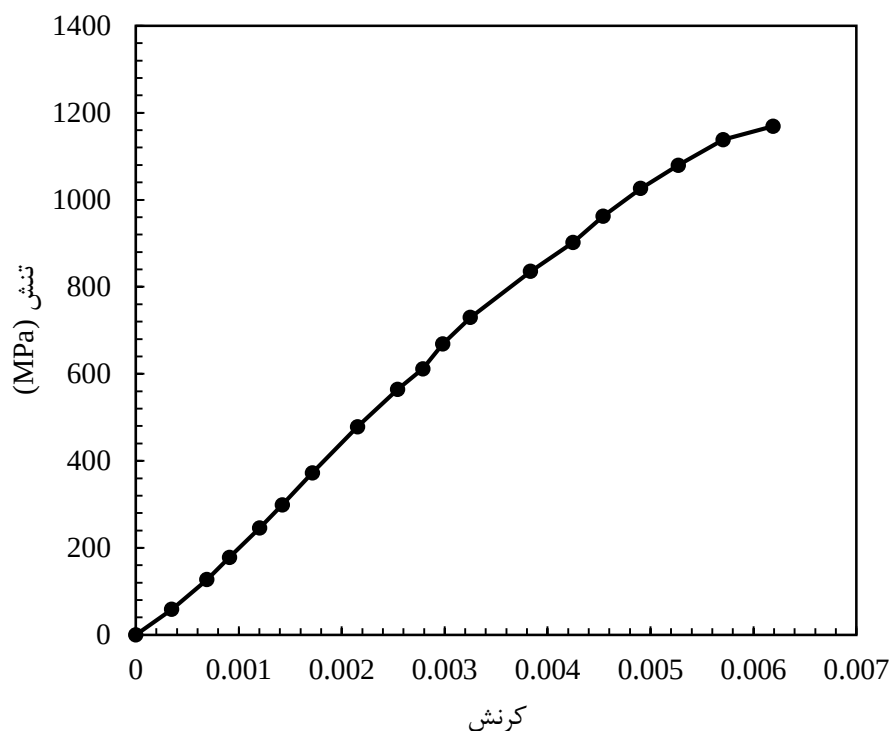


شکل ۳-۹ هندسه اجزای مدل شده در نرم‌افزار شبیه‌سازی

خصوصیات پیچ، سرسیلندر و بلوک سیلندر در جدول ۳-۳ نشان داده شده است. جنس بلوک سیلندر و سرسیلندر چدن خاکستری می‌باشد که خواص آن از مرجع برای شبیه‌سازی استفاده شد. همچنین از آزمون کشش تک‌محوره نمونه ساخته شده بر اساس استاندارد DIN 898 برای تعیین تنش تسلیم و ناحیه مومسان پیچ‌های ساخته شده استفاده شد. به دلیل حساسیت محاسبات اولتراسونیک، به منظور جلوگیری از خطاهای اندازه‌گیری آزمون کشش پیچ کامل با اکستنسیومتر لیزری تا حداکثر نیروی کشش (۲۰ Ton) دستگاه INSTRON 8820 نیز انجام شد (شکل ۳-۱۰).

جدول ۳-۳ خواص مکانیکی پیچ و چدن خاکستری

چگالی (kg/m ³)	مدول یانگ (GPa)	ضریب انبساط حرارتی (1/C°)	ضریب پواسون
پیچ ۷۸۷۰	۲۱۰,۵	۱,۲۳	۰,۲۹
چدن خاکستری ۷۲۰۰	۱۳۰	۱,۱	۰,۲۷



شکل ۳-۱۰ نمودار تنش کرنش پیچ بلند سرسیلندر ساخته شده

۳-۲-۲ تعیین تعداد مراحل بارگذاری و نوع حل مسئله

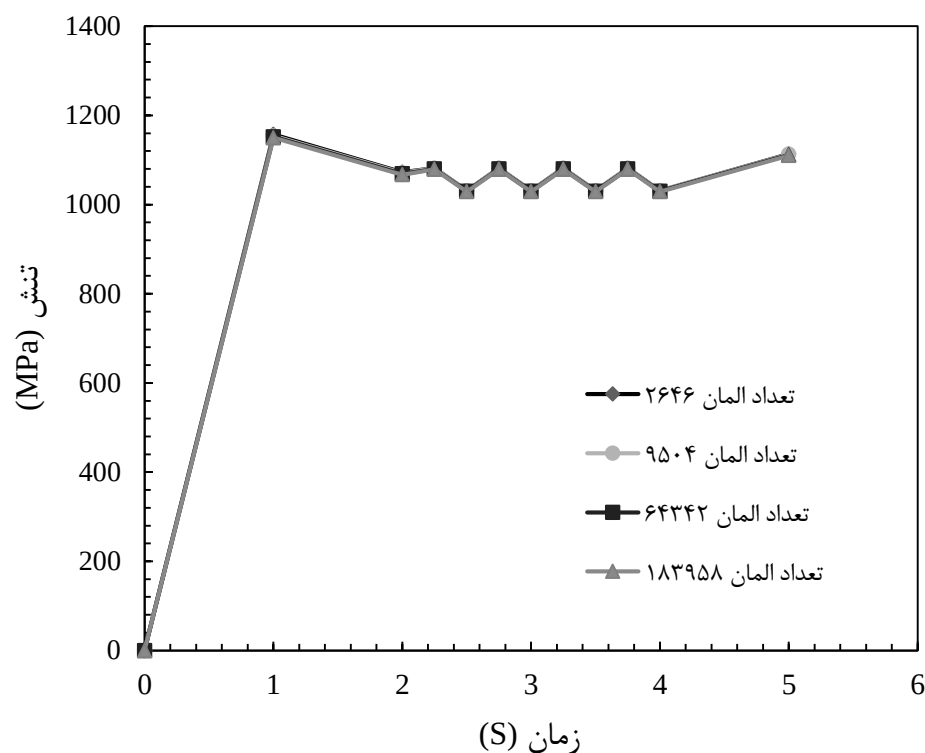
در این مدل‌سازی، مسئله در چهار گام حل می‌شود. با توجه به نوع فرایند و تغییر شکل کم ماده از حلگر استاندارد استفاده شد. در گام اول نیروی همبندی توسط ماژول بارگذاری پیچ با تعیین جمع شدگی طول پیچ به مقدار $1/5 \text{ mm}$ اعمال شد. در گام دوم دمای تمامی قطعات به‌طور یکسان از 20°C سانتی‌گراد به 90°C سانتی‌گراد افزایش یافت. در گام سوم نیروهای نوسانی خارجی ناشی از احتراق به‌صورت محوری به پیچ اعمال و در نهایت با حذف نیروی خارجی، دمای تمامی قطعات به حالت اول برگشت داده شد.

۳-۲-۳ تعیین نوع تماس اجزا و شرایط مرزی

در شبیه‌سازی اثر متقابل سطوح به‌صورت تماس سطح زیر گل پیچ با سرسیلندر و تماس بین سرسیلندر و بلوک سیلندر با مدل اصطکاک پنالتی تعیین شد. به‌منظور ثابت نگه داشتن قطعات شرایط مرزی به کار رفته از نوع صلب در انتهای پیچ و بلوک سیلندر اعمال شد.

۳-۲-۴ شبکه‌بندی

برای شبکه‌بندی پیچ و مجموعه سیلندر از المان C3D8R که المانی پیوسته، سه‌بعدی، هشت گره و با انتگرال‌گیری کاهش یافته می‌باشد، استفاده شد. در این پژوهش برای تعیین تعداد المان‌های بهینه، مسئله با تعداد المان‌های متفاوتی حل شد و نیروی فرایند در هر یک از شبیه‌سازی‌ها مورد بررسی قرار گرفت. از آنجاکه نیروهای وارد بر پیچ از اهمیت بالاتری برخوردار بود المان‌های مجموعه سیلندر ثابت و المان‌های پیچ بررسی شد. مطابق با شکل ۳-۱۱ می‌توان نتیجه گرفت که به دلیل ماهیت استاتیکی مسئله و حلگر استاتیکی مقدار تغییرات نیرو نسبت به نیروی کل کم بوده که اگر تعداد المان‌ها فراتر رود تأثیر چندانی در نیروی کل فرایند نخواهد داشت و همچنین زمان تحلیل را افزایش می‌دهد. بر این اساس تعداد المان‌های بهینه برای پیچ ۲۶۴۶ و برای مجموعه سیلندر ۱۵۲۲۴ تعیین شد.



شکل ۳-۱۱ منحنی استقلال نتایج از شبکه‌بندی

فصل ۴ نتایج و بحث

در این بخش، نخست به آزمون‌های تعیین کلاس پیچ توسط استاندارد، کنترل پارامترهای هندسی و ابعادی پیچ و سپس روابط بین گشتاور و نیروی همبندی پرداخته خواهد شد و ضرایب اصطکاک برای هر پیچ محاسبه می‌شود. در ادامه تغییرات سرعت صوت در فلزات تحت تنش مورد مطالعه قرار گرفته و روابط کالیبراسیون سرعت موج همبندی برای تغییر طول پیچ استخراج خواهد شد. همچنین مقادیر نیروهای همبندی در شرایط واقعی از گشتاورها و ضرایب اصطکاک محاسبه می‌شود. اثر نیروهای خارجی با استفاده از روش المان محدود و حل تحلیلی مورد بررسی قرار می‌گیرد. در نهایت اثر پارامترهای ساخت پیچ از جمله ساخت رزوه و گل پیچ بر عمر خستگی بررسی می‌شود.

۴-۱- نتایج آزمون‌های تعیین کلاس پیچ ساخته شده

کلیه آزمون‌های تعیین کلاس پیچ که در این بخش نتایج آن ارائه می‌شود، در آزمایشگاه مرکز پژوهش متالورژی رازی انجام گرفته است.

۴-۱-۱ آزمون آنالیز شیمیایی

آزمون آنالیز شیمیایی به روش اسپکتومتری نشری توسط دستگاه ARL در دمای ۲۵ درجه سانتی گراد و رطوبت ۳۰٪ انجام گرفت

جهت اطمینان از کلاس ۱۲/۹ آزمون ترکیب شیمیایی برای پیچ ساخته شده انجام گرفت. به صورت پیش فرض کلاس ۱۲/۹ پیچ های اصلی کارخانه موتور دیزل ایزوتا پذیرفته شد اما برای مقایسه آلیاژ دو نوع پیچ اصلی و ساخته شده، یک نمونه آزمون ترکیب شیمیایی از پیچ اصلی نیز انجام گرفت. ترکیب شیمیایی پیچ استاندارد کلاس ۱۲/۹ در جدول ۴-۱ نشان داده شده است. ترکیب شیمیایی نمونه پیچ های اصلی و ساخته شده پایه آهنی بر حسب درصد عناصر وزنی به شرح جدول ۴-۲ می باشد.

جدول ۴-۱ ترکیب شیمیایی پیچ استاندارد کلاس ۱۲/۹

ردیف	عنصر آلیاژی	حد بالا	حد پایین
۱	C	۰/۵	۰/۳۰
۲	P	۰/۲۵	-
۳	S	۰/۰۲۵	-
۴	B	۰/۰۰۳	-
۵	Cr	-	۰/۳۰

جدول ۲-۴ ترکیب شیمیایی پیچ ساخته شده کپه یاتاقان و سرسیلندر و پیچ اصلی سرسیلندر

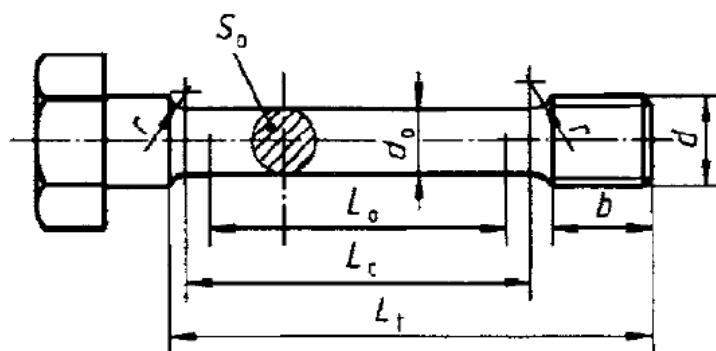
ردیف	عنصر آلیاژی	درصد وزنی عناصر (پیچ ساخته شده کپه یاتاقان و سرسیلندر)	درصد وزنی عناصر (پیچ اصلی کپه یاتاقان)	درصد وزنی عناصر (پیچ اصلی سرسیلندر)
۱	C	۰/۳۸	۰/۳۸	۰/۳۷
۲	Si	۰/۲۵	۰/۲۶	۰/۱۸
۳	Mn	۰/۸۵	۰/۷۸	۰/۷۳
۴	P	۰/۰۱۲	۰/۰۱۲	۰/۰۲۶
۵	S	۰/۰۰۶	۰/۰۱۵	۰/۰۲۴
۶	Cr	۱	۱/۰۵	۰/۸۹
۷	Ni	۰/۰۴	۰/۰۴	۰/۹
۸	Mo	۰/۱۶	۰/۱۹	۰/۲۲
۹	Cu	۰/۰۳	۰/۰۰۶	۰/۲۸
۱۰	V	۰/۰۰۳	۰/۰۰۴	۰/۰۰۵
۱۱	Al	۰/۰۲۴	۰/۰۰۸	۰/۰۴۶
۱۲	Sn	۰/۰۰۴	۰/۰۰۲	۰/۰۲۲
۱۳	As	-	-	۰/۰۰۲
۱۴	Ti	-	-	۰/۰۰۳
۱۵	Co	۰/۰۰۲	-	-
۱۶	Nb	-	-	۰/۰۰۵

آلیاژ پیچ فولاد کلاس ۱۲/۹ باید دارای یکی از عناصر با حداقل درصد وزنی؛ نیکل ۰/۳۰٪، کرم ۰/۳۰٪، مولیبدن ۰/۲۰٪، وانادیم ۰/۱۰٪ را دارا باشد. اگر در آلیاژ فولاد دو، سه و یا چهار عنصر بالا موجود باشند، مقدار مجموع ۰/۷۰٪ مقادیر عناصر ذکر شده نیز کافی است [۴۲]. همان گونه در جدول ۲-۴ مشخص شده ترکیب شیمیایی پیچ سرسیلندر و کپه یاتاقان موتور دیزل دارای حداقل ۰/۳۰٪ کرم می باشد.

استاندارد مرجع آزمون ASTM E415-14 می‌باشد. آلیاژ مورد استفاده در تولید پیچ با استاندارد DIN EN ISO 898-1 کلاس ۱۲/۹ مطابقت دارد. نتایج بررسی‌ها نشان داد که براساس استاندارد DIN جنس پیچ‌های اصلی 36CrNiMo4 و جنس پیچ‌های ساخته شده، پیچ کپه یاتاقان اصلی و ساخته شده 42CrMo4 می‌باشد.

۴-۱-۲ آزمون کشش تک‌محوره

یکی از مهم‌ترین آزمون‌ها برای تعیین خواص مکانیکی فلزات آزمون کشش می‌باشد. حداقل استحکام تسلیم یا حداقل تغییر طول ۰/۲٪، استحکام تسلیم، کاهش سطح مقطع و ازدیاد طول نسبی بعد از شکست، خواصی می‌باشند که از طریق آزمون کشش باید برای پیچ اندازه‌گیری شوند. مقادیر ذکر شده باید در محدوده مجاز کلاس پیچ باشند. آماده‌سازی ابعاد به‌جز پیچ‌های کلاس ۴،۸، ۵،۸ و ۶،۸ که با ابعاد اصلی کشیده می‌شوند، برای کشش پیچ‌های M16×1.5 و M18×1.5 براساس استاندارد BS EN ISO 6892-1 مطابق شکل ۴-۱ انجام شد.



شکل ۴-۱ طرح‌واره نمونه آزمون کشش پیچ

آزمون کشش در دمای محیط و رطوبت ۴۰٪ انجام گرفت. عدم قطعیت نتایج برابر $\pm 3\%$ می‌باشد. برای محاسبه ازدیاد طول نسبی و کاهش سطح مقطع به ترتیب از معادله ۴۰ و ۴۱ استفاده می‌شود. برای پیچ کلاس ۱۰،۹ و ۱۲/۹ بین تنش تسلیم و استحکام نهایی معادله ۴۲ باید برابر یا بیشتر از مقدار ۹۰٪

برقرار باشد که برای پیچ‌های M18×1.5 و M16×1.5 به ترتیب ۹۴٪ و ۹۰٪ است. نتایج آزمون کشش و حدود مجاز استاندارد در جدول ۳-۴ نشان داده شده است.

$$A = \frac{L_u - L_0}{L_0} \times 100\% \quad ۴۰$$

$$Z = \frac{S_0 - S_u}{S_0} \times 100\% \quad ۴۱$$

$$\frac{R_{eL} \text{ or } R_{p0.2}}{R_m} \times 100\% \geq 90\% \quad ۴۲$$

جدول ۳-۴ آزمون کشش پیچ کپه یاتاقان M18×1.5 و پیچ بلند سرسیلندر M16×1.5 ساخته شده

پیچ	قطر نمونه D (mm)	استحکام افست ۰.۲٪	استحکام نهایی (MPa)	ازدیاد طول نسبی (%)	کاهش سطح مقطع (%)
M18×1.5	۱۰,۰۰	۱۲۳۴	۱۳۰۳	۱۳/۵	۵۶
M16×1.5	۱۰/۰۱	۱۲۱۱	۱۳۳۸	۱۴	۵۸
حد مجاز استاندارد		> ۱۱۰۰	> ۱۲۲۰	> ۸	> ۴۴

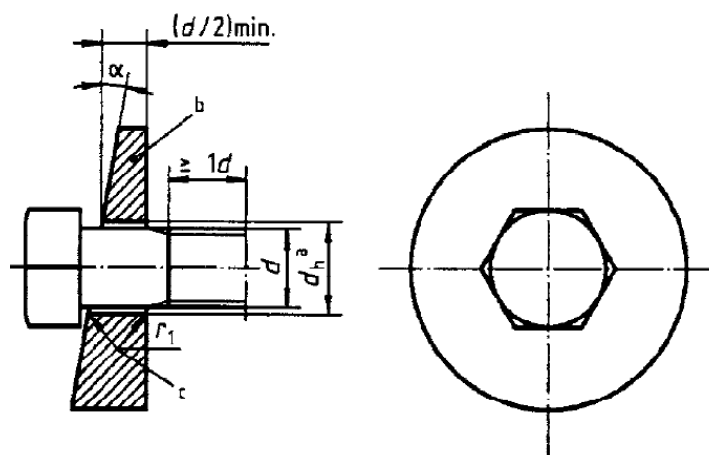
جنس و روش ساخت پیچ کوتاه و بلند کاملاً مشابه هم است و تنها در طول پیچ متفاوت می‌باشند. مقایسه نتایج آزمون‌های کشش انجام‌شده با استاندارد کلاس ۱۲/۹ مطابقت داشته و در محدوده مجاز استاندارد قرار دارد.

۳-۱-۴ آزمون بار گواه

در آزمون باره گواه پیچ باید بر اساس استاندارد تا استحکام تسلیم ۰.۲٪ که در کلاس ۱۲/۹ برای پیچ‌های M18×1.5 و M16×1.5 به ترتیب به مقدار ۱۶۲ kN و ۲۱۰ kN می‌باشد، به مدت زمان ۱۵ ثانیه بارگذاری شود. سرعت بارگذاری نباید بیشتر از $3 \frac{mm}{min}$ باشد. درنهایت طول پیچ بعد از بارگذاری باید با تیرانس $\pm 12/5 \mu m$ ثابت و برابر اندازه اولیه باشد که در آزمون بار گواه این شرایط برقرار بود.

۴-۱-۴ آزمون گوه

آزمون گوه بر روی تجهیزات استاندارد کشش ISO 6891 با گوه‌ای که در شکل ۴-۲ نشان داده شده انجام می‌پذیرد. یک صفحه گوه‌ای شکل با ابعادی مطابق کلاس و ابعاد پیچ در زیر گل پیچ قرار می‌گیرد. آزمون کشش گوه‌ای باید تا زمانی ادامه یابد که شکست در ناحیه رزوه‌های آزاد و یا ساق پیچ در بالای حد استحکام تسلیم اتفاق افتد. شکست در ناحیه گل پیچ مورد تأیید نیست. برای پیچ‌هایی که دارای قطر گل پیچ بیشتر از $1/7 d$ می‌باشند، اگر شکست در گل پیچ اتفاق افتد، گل پیچ به قطر $1/7 d$ ماشین‌کاری و آزمون دوباره انجام می‌شود. نتایج آزمون کشش گوه در جدول ۴-۴ نشان داده شده است.



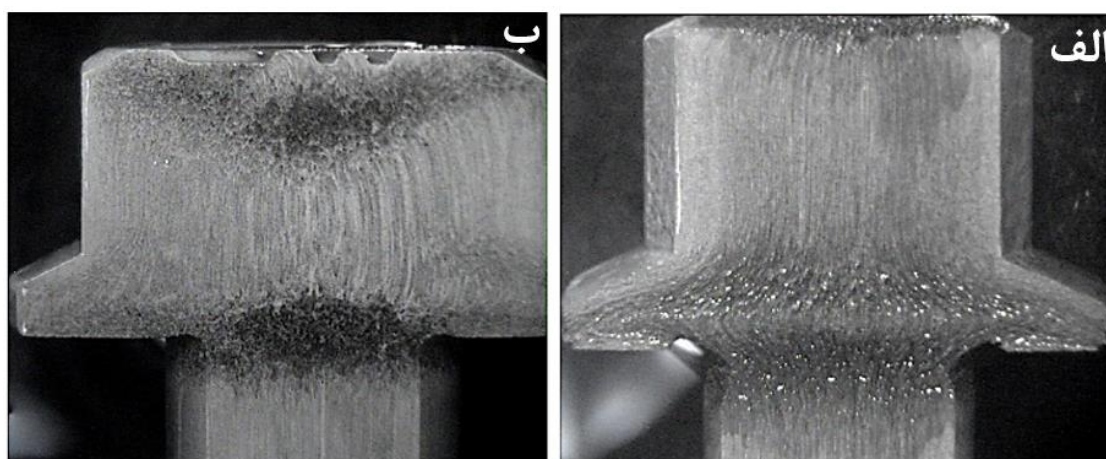
شکل ۴-۲ طرح‌واره نمونه آزمون گوه پیچ

جدول ۴-۴ آزمون کشش گوه پیچ ساخته شده سرسیلندر و یاتاقان کپه

پیچ	حداقل نیروی کشش استاندارد کلاس ۱۲/۹ (kN)	نیروی شکست (kN)	محل شکست
M18×1.5	۲۶۴	۲۷۳/۲۸	رزوه
M16×1.5	۲۰۴	۲۱۹/۵۳	رزوه

۴-۱-۵ ساختار میکروسکوپی

روش تولید پیچ تأثیر به سزایی در رفتار مکانیکی، عمر خستگی و مقاومت به خوردگی پیچ خواهد داشت. سطح مقطع نمونه‌ها در محلول ظاهر کننده HCl 50% به مدت ۸۰ دقیقه و دمای ۳۰ درجه سانتی‌گراد آماده‌سازی شد. به‌منظور تشخیص فرایند نهایی و نوع فرایند تولید با استفاده از میکروسکوپ نوری، تصاویری از نمونه‌ها تهیه شد. بر اساس مشاهدات انجام‌گرفته بر روی نمونه‌های ماکروگرافی آماده‌سازی شده در سطح مقطع مورد بررسی در شکل ۳-۵ خطوط سیلان ماده مورد مطالعه قرار گرفت که از جهت‌گیری‌های قابل قبولی برخوردار می‌باشد و نشان‌دهنده فرایند تولید فورج سرد است. خطوط سیلان در نواحی گوشه‌ها و انحنای قطعه دارای قطع‌شدگی‌هایی می‌باشد که ناشی از عملیات ماشین‌کاری نهایی است.

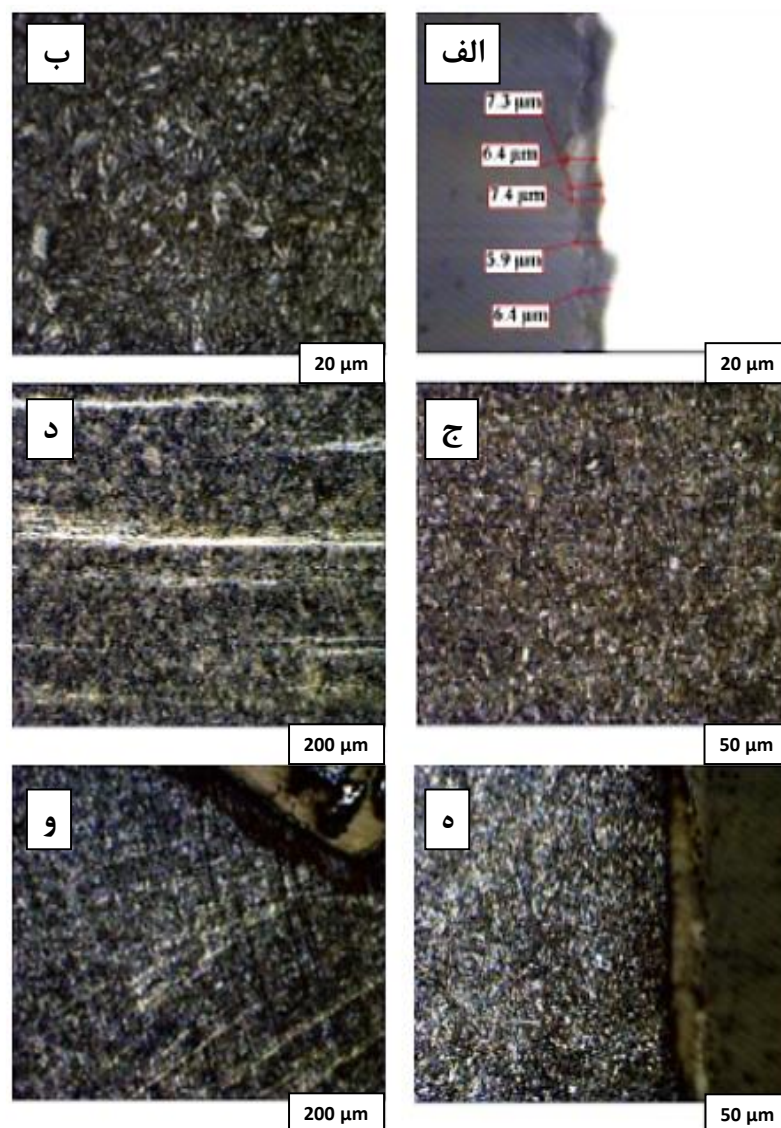


شکل ۴-۳ تصاویر میکروسکوپی در محلول ظاهر کننده HCl 50% به مدت ۸۰ دقیقه و دمای ۳۰ درجه سانتی‌گراد (الف) پیچ M18×1.5 (ب) پیچ M16×1.5

۴-۱-۶ روش میکروسکوپی

نتایج حاصل از عکس‌برداری میکروسکوپی از سطح مقطع طولی پیچ بلند سرسیلندر M18×1.5 در شکل ۴-۴ نشان داده‌شده است. قسمت (الف) در ناحیه رزوه‌ها لایه پوشش به ضخامت $5/9 - 7/4 \mu m$ و در قسمت (ب) در مرکز قطعه کار ساختار مارتنزیت تمپر شده به همراه مقادیر جزئی فریت مشاهده گردید که در قسمت (ج) با بزرگنمایی بالاتری نشان داده‌شده است. قسمت (د) جدایش فازی در

ریزساختار و قسمت (ه) کشیدگی ساختار در ناحیه رزوها که در اثر فرایند تولید نورد است را نشان می‌دهد. قسمت (و) عدم لایه کربن‌زدایی شده کامل و جزئی را نشان می‌دهد. هیچ‌گونه لایه سخت شده مشاهده نشد.

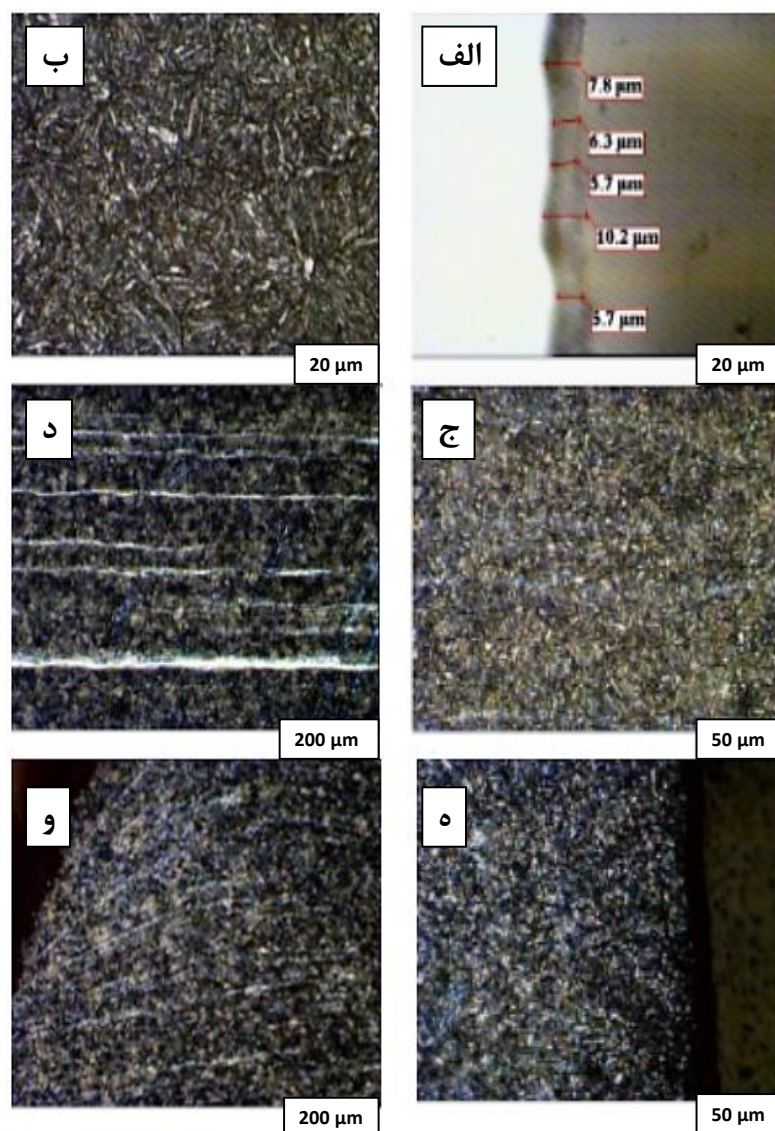


شکل ۴-۴ تصاویر میکروسکوپی سطح مقطع پیچ M18×1.5

نتایج حاصل از عکس‌برداری میکروسکوپی از سطح مقطع طولی پیچ کپه یاتاقان M16×1.5 در شکل ۴-۵ نشان داده شده است. قسمت (الف) در ناحیه رزوها لایه پوشش به ضخامت $5/9 - 7/3 \mu m$ و در قسمت (ب) در مرکز قطعه کار ساختار مارتنزیت تمپر شده به همراه مقادیر جزئی فریت مشاهده گردید

که در قسمت (ج) با بزرگنمایی بالاتری نشان داده شده است. قسمت (د) جدایش فازی در ریزساختار و قسمت

(ه) کشیدگی ساختار در ناحیه رزوه‌ها که در اثر فورج سرد است را نشان می‌دهد. قسمت (و) عدم لایه کربن‌زدایی شده کامل و جزئی را نشان می‌دهد. هیچ‌گونه لایه سخت شده مشاهده نشد.



شکل ۴-۵ تصاویر میکروسکوپی سطح مقطع پیچ 1.5M16

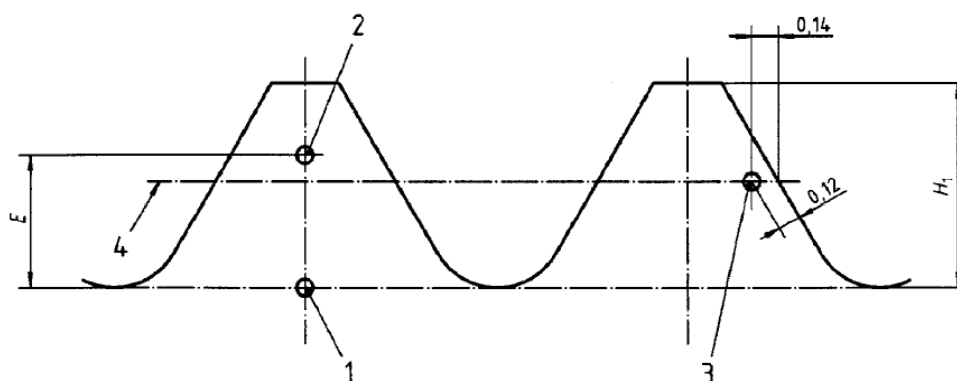
۴-۱-۷ آزمون سختی سنجی

آزمون سختی به‌طور کلی در پنج نقطه انجام می‌گیرد که شامل سطح، مغز و سه نقطه مشخص بر روی رزوه پیچ است. سختی سنجی سطحی می‌تواند با کمی پولیش و سنگ‌زنی بر روی گل پیچ و یا پس از

حذف پوشش بر روی ساقه یا انتهای پیچ انجام پذیرد. از تفاوت سختی در مغز و سطح پیچ در کلاس‌های ۸,۸ تا ۱۲/۹ می‌توان در مورد وضعیت کربن‌زدایی سطحی پیچ قضاوت کرد. از آزمون سختی سنجی فقط برای گام‌های بزرگ‌تر یا مساوی ۱/۵ میلی‌متر استفاده می‌شود. سختی سنجی در سه نقطه نشان داده شده در شکل ۴-۶ انجام می‌گیرد. مقدار ارتفاع E از استاندارد برای گام ۱/۵ mm و کلاس ۱۲/۹ مقدار ۰/۶۹mm و نیروی بارگذاری ۳۰۰ g می‌باشد. حداقل ارتفاع E ناحیه کربن‌زدایی نشده به مقدار ۰/۶۹ است. سختی سنجی در نقطه ۳ باید بر روی خط گام و رزوه مجاوری باشد که سختی یک و دو اندازه‌گیری شد. سختی سنجی در نقطه ۲ باید بزرگ‌تر یا مساوی سختی ویکرز در نقطه ۱ منهای ۳۰ باشد (معادله ۴۳). سختی ویکرز در نقطه ۳ باید کوچک‌تر یا مساوی سختی ویکرز در نقطه ۱ بعلاوه ۳۰ باشد (معادله ۴۴). تعیین وضعیت کامل نواحی کربن‌زدایی شده را نمی‌توان با روش سختی سنجی اندازه‌گیری کرد.

$$HV_2 \geq HV_1 - 30 \quad 43$$

$$HV_3 \leq HV_1 + 30 \quad 44$$



شکل ۴-۶ طرح‌واره نقاط سختی سنجی برای آزمون کربن‌زدایی [۱]

نتایج آزمون سختی سنجی به روش ویکرز با فرم هرم الماسه برای پیچ‌های M16×1.5 و M18×1.5 بر اساس استاندارد ASTM 384-12 با سه بار تکرار و میانگین‌گیری در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد به ترتیب در جدول ۴-۵ و جدول ۴-۶ نشان داده شده است.

جدول ۴-۵ آزمون سختی سنجی ویکرز پیچ M18×1.5

ردیف	موقعیت	سختی HV			میانگین
		سختی ۱	سختی ۲	سختی ۳	
۱	مغز	۳۶۴	۳۶۹	۳۶۵	۳۶۶
۲	سطح	۴۱۵	۴۰۹	۴۱۱	۴۱۲
۳	نقطه ۱	۳۷۳	۳۷۷	۳۷۳	۳۷۴
۴	نقطه ۲	۴۰۰	۴۰۲	۴۰۴	۴۰۲
۵	نقطه ۳	۳۸۹	۳۹۸	۳۹۴	۳۹۴

جدول ۴-۶ آزمون سختی سنجی ویکرز پیچ M16×1.5

ردیف	موقعیت	عدد سختی HV			میانگین
		سختی ۱	سختی ۲	سختی ۳	
۱	مغز	۴۲۴	۴۲۹	۴۲۹	۴۲۷
۲	سطح	۴۲۴	۴۲۰	۴۲۴	۴۲۳
۳	نقطه ۱	۴۱۵	۴۱۱	۴۰۹	۴۱۲
۴	نقطه ۲	۴۰۴	۳۹۸	۴۰۲	۴۰۱
۵	نقطه ۳	۴۱۵	۴۲۰	۴۱۵	۴۱۷

براساس نتایج سختی سنجی، معادلات ۴۳ و ۴۴ برای سختی سنجی برقرار است و دامنه سختی براساس استاندارد در محدوده بین HV ۳۸۵ تا HV ۴۳۵ می باشد. در نتیجه ناحیه کربن زدایی نشده در محدوده مجاز قرار دارد.

۴-۱-۸ آزمون سختی سنجی ویکرز (قبل و بعد از عملیات حرارتی)

در این آزمون مقادیر میانگین سختی با تکرار ۳ آزمون در مغز پیچ قبل و بعد از عملیات حرارتی نباید بیشتر از HV ۲۰ تفاوت داشته باشد. تمپر کردن مجدد در ۱۰ درجه سانتی گراد پایین تر از حداقل دمای تمپر کردن و به مدت ۳۰ دقیقه انجام می پذیرد. در این آزمون تمپر کردن در دمای ۴۱۵ درجه

سانتی‌گراد به مدت ۳۰ دقیقه و خنک کردن در هوا انجام شد. نیروی اعمالی ۳۰ g، فرورونده به شکل هرم الماسه و زمان اعمال نیرو بین ۱۰ تا ۱۵ ثانیه و اختلاف سختی قبل و بعد از عملیات حرارتی برای پیچ‌های $M16 \times 1.5$ و $M18 \times 1.5$ به ترتیب به مقدار ۸ HV و ۲ HV بود که در محدوده مجاز قرار داشت. نتایج آزمون سختی‌سنجی به روش ویکرز برای پیچ‌های $M16 \times 1.5$ و $M18 \times 1.5$ براساس استاندارد ASTM 384-12 در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد به ترتیب در جدول ۴-۷ و جدول ۴-۸ بیان شده است. دامنه سختی براساس استاندارد در محدوده بین ۳۸۵ HV تا ۴۳۵ HV می‌باشد.

جدول ۴-۷ آزمون سختی‌سنجی به روش ویکرز (قبل و بعد از عملیات حرارتی) پیچ $M18 \times 1.5$ ساخته شده

ردیف	موقعیت	سختی HV			میانگین
		سختی ۱	سختی ۲	سختی ۳	
۱	مغز (قبل از عملیات حرارتی)	۴۰۶	۴۰۹	۴۱۱	۴۰۹
۲	مغز (بعد از عملیات حرارتی)	۴۰۰	۴۰۲	۴۰۰	۴۰۱

جدول ۴-۸ آزمون سختی‌سنجی به روش ویکرز (قبل و بعد از عملیات حرارتی) پیچ $M16 \times 1.5$ ساخته شده

ردیف	موقعیت	سختی HV			میانگین
		سختی ۱	سختی ۲	سختی ۳	
۱	مغز (قبل از عملیات حرارتی)	۴۰۲	۴۰۰	۴۰۴	۴۰۲
۲	مغز (بعد از عملیات حرارتی)	۴۰۲	۴۰۴	۴۰۶	۴۰۴

۴-۱-۹ آزمون ضربه

آزمون ضربه نمونه شیاردار به مقیاس وسیعی به‌عنوان معیار پذیرش مواد مورد استفاده قرار می‌گیرد. این آزمون امتیاز قابلیت تعیین تمایل به تردی که در آزمون‌های کشش یا سختی استاندارد معلوم نمی‌شود را دارد. در فلزها هرگونه افزایش دما باعث فعال‌تر شدن نابجایی‌ها و در نتیجه کاهش استحکام

تسلیم می‌شود. فولادهای کم‌کربن در آهنگ‌های کم کرنش در تمام دماهای بالای ۱۷۰ درجه سانتی‌گراد نرم هستند، ولی هنگامی که در معرض بارهای ضربه‌ای قرار می‌گیرند، در گستره باریکی از دما در نزدیکی صفر درجه سانتی‌گراد، نحوه شکست از حالت رشته‌ای چقرمه به حالت رخ برگی ترد تبدیل می‌شود. بعضی از عناصر آلیاژی می‌توانند بر دمای تبدیل از رفتار نرم به ترد اثر بگذارند. منگنز و نیکل دمای تبدیل را پایین می‌آورند ولی کربن، ازت و فسفر آن را افزایش می‌دهند.

در آزمون ضربه از روش شارپی با شیار V شکل (زاویه ۴۵ درجه و عمق ۲ mm) با ابعاد ۵۵×۱۰×۱۰ mm استفاده شد. استاندارد مرجع آزمون ASTM E32-2012 و دمای آزمون ۲۰- درجه سانتی‌گراد و ۲۵+ درجه سانتی‌گراد بود. نمونه آزمون‌ها نزدیک به سطح رزوه‌ها انتخاب شد. این آزمایش تنها برای پیچ‌های با قطر بزرگتر از ۱۶ mm امکان‌پذیر است. حداقل استحکام ضربه برای نمونه ساخته شده از پیچ کلاس ۱۲/۹ در دمای محیط (۱۰ تا ۳۵ درجه سانتی‌گراد) باید J ۱۵ باشد. نتایج آزمون ضربه برای پیچ سرسیلندر و یاتاقان کپه ساخته شده و پیچ سرسیلندر اصلی در جدول ۴-۹ و جدول ۴-۱۰ نشان داده شده است. براساس نتایج به‌دست آمده، هم پیچ‌های ساخته شده و هم پیچ‌های اصلی شرایط عمومی کلاس ۱۲/۹ را دارا می‌باشند ولی با توجه به وجود عنصر نیکل در پیچ سرسیلندر اصلی، ضربه‌پذیری این پیچ در حالت سرد و دمای محیط بهتر از پیچ سرسیلندر ساخته شده است. وجود چقرمگی کمتر پیچ سرسیلندر ساخته شده در مقایسه با پیچ اصلی می‌تواند بر عملکرد پیچ در شرایط واقعی کارکرد تأثیر گذار باشد که در فرایندهای صحه‌گذاری خستگی و موتوری می‌بایست مورد ارزیابی قرار گیرد.

جدول ۴-۹ آزمون ضربه شاری در دمای ۲۰- درجه سانتی گراد

ردیف	پیچ	ضربه ۱ (J)	ضربه ۲ (J)	ضربه ۳ (J)	میانگین (J)
۱	CHL-O	۴۴	-	-	۴۴
۲	CHL-M	۳۲	۳۲	۳۰	۳۱
۳	MBR-M	۳۸	۳۸	۴۲	۳۹

جدول ۴-۱۰ آزمون ضربه شاری در دمای ۲۵ درجه سانتی گراد

ردیف	پیچ	ضربه (J)
۱	CHL-O	۴۸
۲	CHL-M	۳۶

۴-۱-۱۰ پوشش

به منظور تعیین نوع لایه پوشش رزوه، نتیجه درصد وزنی ترکیب شیمیایی پوشش که به صورت نیمه متمرکز انجام گرفته، در جدول ۴-۱۱ جدول ۴-۱۲ به ترتیب برای پیچ ساخته شده و اصلی نشان داده شده است. نتایج نشان دهنده وجود پوشش فسفات روی بر روی پیچ‌های ساخته شده و فسفات منگنز بر روی پیچ‌های اصلی می‌باشد. این تفاوت پوشش، می‌تواند بر ضریب اصطکاک رزوه اثرگذار باشد که می‌بایست رابطه همبندی و نیروی پیش‌بار در دو نوع پیچ ساخته شده و اصلی انجام پذیرد. علاوه بر این وجود این تفاوت در پوشش می‌تواند بر میزان خوردگی پیچ در محیط‌های خورنده تأثیر گذار باشد. نتایج آزمون حمام نمک بر روی دو نوع پیچ اصلی و ساخته شده حاکی از عملکرد قابل قبول پوشش فسفات روی از نظر خوردگی است.

جدول ۴-۱۱ ترکیب شیمیایی پوشش پیچ‌های ساخته شده (SEM)

ردیف	عناصر آلیاژی	درصد وزنی
۱	O	۶۰/۸۷
۲	P	۱۲/۴۹
۳	Zn	۲۶/۶۴

جدول ۴-۱۲ ترکیب شیمیایی پوشش پیچ‌های اصلی (SEM)

ردیف	عناصر آلیاژی	درصد وزنی
۱	Fe	۲۶/۸۰
۲	P	۱۴/۷۰
۳	Mn	۱۵/۳۵
۴	O	۴۳/۱۵

۴-۲- کنترل ابعادی و هندسی

پیچ‌های ساخته شده از لحاظ ابعادی (طول رزوه، ابعاد گل پیچ، طول گل پیچ، قطر ساق پیچ و ...) با نقشه ساخت مقایسه شدند. بررسی تلرانس‌های ساخت رزوه با گیج‌های برو و نرو و زاویه بین رزوه‌ها با دستگاه نوری انجام شد. لنگی پیچ نیز با استفاده از ساعت اندازه‌گیری و گیج V شکل کنترل شد. نحوه اندازه‌گیری‌های ابعادی، گیج برو نرو، پروفیل رزوه و لنگی پیچ در شکل ۴-۷ نشان داده شده است. تمامی این آزمون‌ها برای هر سه پیچ کوتاه و بلند سرسیلندر و پیچ یاتاقان کپه انجام شد. نتایج قابل قبول و در محدوده تلرانس‌های مجاز تعریف شده قرار داشت.



شکل ۴-۷ فرایندهای کنترل ابعادی و هندسی پیچ‌های ساخته شده (الف) کنترل پروفیل رزوه (ب) کنترل ابعادی (ج) کنترل لنگی (د) کنترل انطباقات

۴-۳- آزمون‌های وظیفه‌ای

۴-۳-۱ آزمون اندازه‌گیری گشتاور معادل سفت کردن زاویه‌ای در شرایط همبندی واقعی (آزمون اول)

در این آزمون مقادیر گشتاور اعمالی در همبندی سرسیلندر و یاتاقان کپه بر روی بلوک سیلندر با استفاده از آچار گشتاور-زاویه اندازه‌گیری شد. این آزمون برای پیچ‌های اصلی سرسیلندر و یاتاقان کپه در یک مرحله و برای پیچ‌های ساخته شده کپه یاتاقان ۳ مرحله انجام شد که در مرحله سوم پوشش فسفات روی با برس سیمی حذف شد. آزمون پیچ‌های ساخته شده سرسیلندر نیز ۲ مرحله انجام شد که در مرحله دوم پوشش فسفات روی به‌منظور بررسی اثر پوشش بر روی نیروی همبندی با برس سیمی حذف شد. نتایج حاصل از همبندی پیچ اصلی و ساخته شده یاتاقان کپه در جدول ۴-۱۳ بر اساس شماره‌گذاری پیچ‌ها در شکل ۳-۳ نشان داده شده است. همچنین نتایج همبندی پیچ اصلی و

ساخته شده سرسیلندر بر اساس شماره گذاری شکل ۲-۳ در جدول ۴-۱۴ بیان شد. تمامی پیچ‌های اصلی کارکرده بودند.

جدول ۴-۱۳ گشتاورهای اعمالی در مراحل مختلف همبندی پیچ اصلی و ساخته شده یاتاقان کپه

ردیف	پیچ	گشتاور زاویه اول (N.m)	گشتاور زاویه دوم (N.m)	گشتاور باز کردن (N.m)
پیچ اصلی	MBR-O-1	۲۳۳	۳۵۵	۳۰۹
	MBR-O-2	۲۲۱	۳۳۳	۲۸۸
پیچ ساخته شده (همبندی مرحله اول)	MBR-M-1	۱۸۲	۲۵۷	۲۳۴
	MBR-M-2	۱۹۴	۲۷۲	۲۴۹
پیچ ساخته شده (همبندی مرحله دوم)	MBR-M-1	۱۹۵	۲۸۶	-
	MBR-M-2	۱۸۱	۲۸۲	۲۶۹
پیچ ساخته شده (همبندی مرحله سوم، بدون پوشش)	MBR-M-1	۲۰۶	۳۱۷	۲۷۹
	MBR-M-2	۱۹۴	۳۱۲	۲۹۸

ملاحظات: گشتاور ۴۵ درجه اول پیچ‌های MBR^۱-O-2 و MBR-M-1 به ترتیب به دلیل خطای اپراتوری ۴۷ و ۴۶ درجه اعمال شد. این مقدار خطا باعث تغییر زیاد در گشتاور اعمالی نمی‌شود.

بر اساس نتایج جدول ۴-۱۳ می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش تعداد مراحل همبندی پیچ‌های ساخته شده نو، رفتار آنها به پیچ‌های اصلی کارکرده نزدیک می‌شود (گشتاور اعمالی در هر مرحله افزایش می‌یابد) و با افزایش گشتاور همبندی، گشتاور باز کردن پیچ‌ها نیز افزایش می‌یابد.

^۱ Main Bearing

جدول ۴-۱۴ گشتاورهای اعمالی در مراحل مختلف همبندی پیچ اصلی و ساخته شده سرسیلندر

ردیف	پیچ	گشتاور زاویه اول (N.m)	گشتاور زاویه دوم (N.m)	گشتاور باز کردن (N.m)
پیچ اصلی	CHS-O-1	۳۴۹	۴۲۲	۳۲۴
	CHL-O-2	۳۸۸	۴۵۷	۴۴۰
	CHL-O-3	۳۹۹	۴۷۳	-
	CHL-O-4	۳۷۸	۴۵۰	-
	CHL-O-5	۴۰۹	۴۸۹	-
	CHL-O-6	۴۱۷	۵۰۰	-
پیچ ساخته شده (همبندی مرحله اول)	CHS-M-1	۳۷۱	۴۸۴	۳۸۷
	CHL-M-2	۳۵۵	۴۲۵	۳۴۱
	CHL-M-3	۳۸۲	۴۶۱	۳۵۹
	CHL-M-4	۳۴۹	۴۲۲	۳۳۶
	CHL-M-5	۳۴۸	۴۳۰	۳۴۴
	CHL-M-6	۳۶۱	۴۱۸	۳۳۹
پیچ ساخته شده (همبندی مرحله دوم)	CHS-M-1	۳۸۹	۴۹۴	۴۱۵
	CHL-M-2	۳۵۹	۴۳۷	۳۵۳
	CHL-M-3	۳۵۳	۴۳۴	۳۵۰
	CHL-M-4	۳۵۵	۴۳۴	۳۵۷
	CHL-M-5	۳۵۶	۴۴۸	۳۷۱
	CHL-M-6	۳۶۸	۴۳۹	۳۷۷

ملاحظات: گشتاور ۹۰ درجه اول پیچ CHL^۱-O-2 و گشتاور ۹۰ درجه دوم پیچهای CHL-O-2، CHL-

O-6 به دلیل خطای اپراتوری به ترتیب ۹۵، ۹۳ و ۹۴ درجه اعمال شد. در مرحله اول همبندی پیچ

CHS^۲-M-1 زاویه ۶۰ درجه دوم نیز به مقدار ۸۴ درجه اعمال شد.

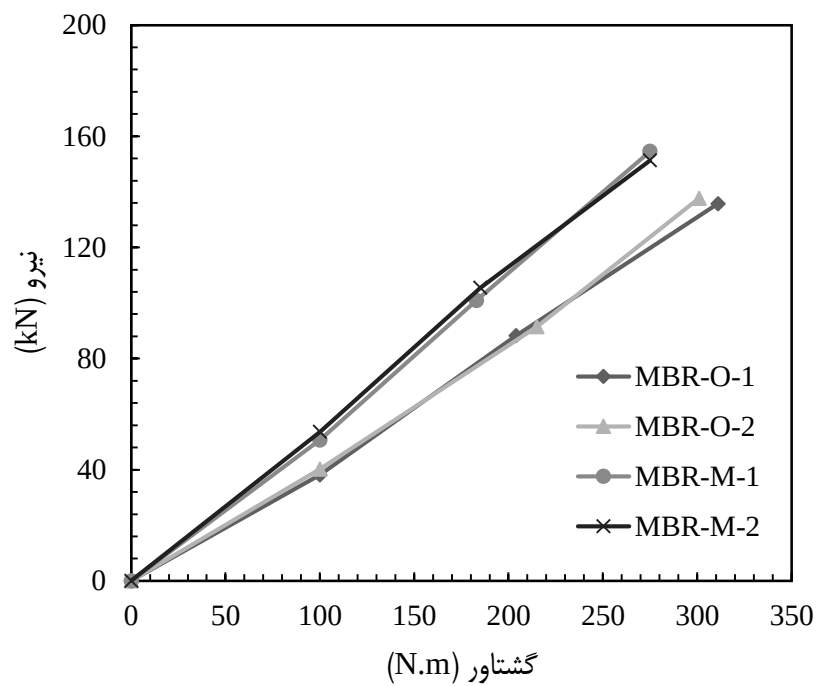
^۱ Cylinder Head Long

^۲ Cylinder Head Short

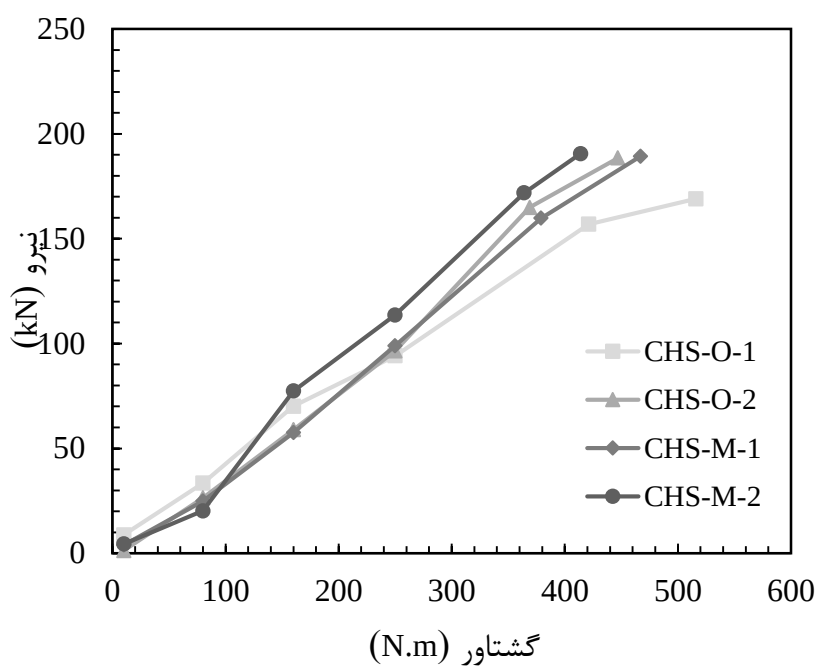
با بررسی نتایج جدول ۴-۱۴ با افزایش تعداد مراحل همبندی پیچ‌های ساخته شده نو، رفتار گشتاورهای اعمالی در همبندی و باز کردن نسبت به پیچ‌های اصلی به یکدیگر نزدیک می‌شود اما هنوز به دلیل اینکه پیچ‌ها در همبندی اول و دوم تقریباً نو هستند، گشتاورهای همبندی آنها نسبت به پیچ‌های اصلی متفاوت است.

۴-۳-۲ آزمون اندازه‌گیری گشتاور معادل نیروی همبندی پیچ (آزمون دوم)

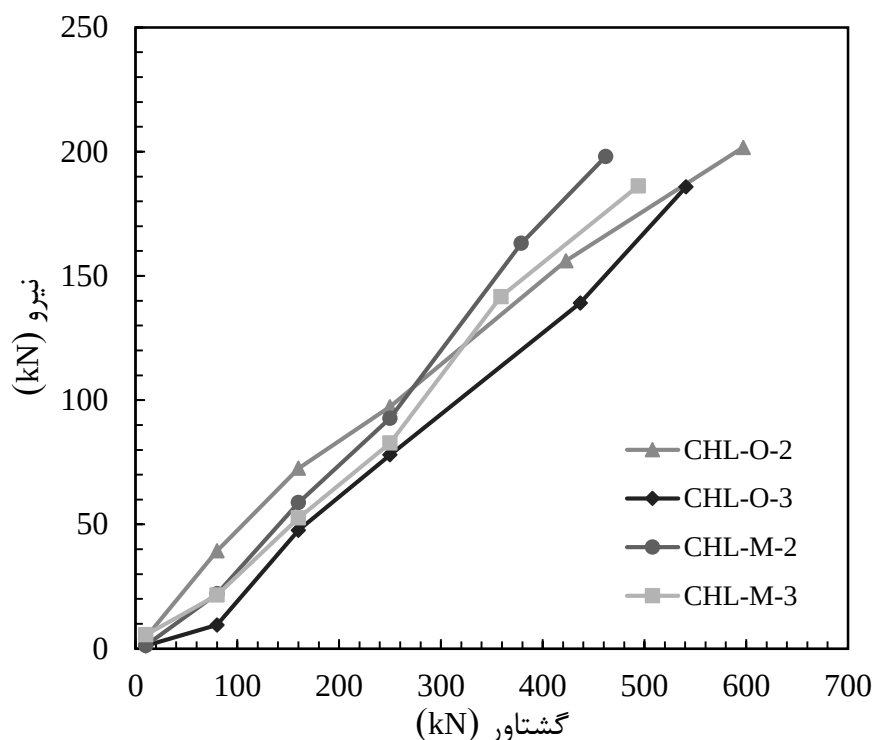
به منظور تعیین نیروی همبندی از گشتاور و زاویه اعمالی در آزمون اول نیاز به محاسبه ضریب اصطکاک است. پیش زمینه محاسبه ضریب اصطکاک، آگاهی از نیروی همبندی می‌باشد. به همین دلیل مقادیر نیروی همبندی بر اساس فرایند بستن با استفاده از واشر نیروسنج اندازه‌گیری شد. در این آزمون برای مقایسه نیروی همبندی از پیچ‌های ساخته شده بدون پوشش (کارکرده) استفاده شد. دلیل این امر این بود که پیچ‌های اصلی کارکرده بودند و مقایسه بهتر با پیچ‌های ساخته شده کارکرده امکان‌پذیر بود. تمامی پیچ‌ها، پیچ‌های آزمون مرحله اول با نام مشابه می‌باشند و تنها دو پیچ کوتاه CHS-M-2 و CHS-O-2 خارج از آزمون مرحله اول در این آزمون وارد شدند؛ زیرا در شش پیچ سرسیلندر تنها یک پیچ کوتاه وجود دارد و برای تکرار آزمون برای دو پیچ، نیاز به پیچ دیگری نیز بود. پیچ CHS-M-2 نو و فاقد پوشش بود. نتایج حاصل از همبندی پیچ‌های اصلی و ساخته شده بر اساس فرایند همبندی جدول ۳-۲ در شکل ۴-۸ تا شکل ۴-۱۰ نشان داده شده است.



شکل ۴-۸ نمودار نیروی همبندی و گشتاور پیچ یاتاقان کپه



شکل ۴-۹ نمودار نیروی همبندی و گشتاور پیچ کوتاه سرسیلندر



شکل ۴-۱۰ نمودار نیروی همبندی و گشتاور پیچ بلند سرسیلندر

در شکل ۴-۸ مقدار تکرارپذیری نیرو و گشتاور اعمالی توسط دو پیچ یاتاقان کپه با شرایط مشابه در تعداد دفعات همبندی و عدم داشتن پوشش نشان داده شده است. با مقایسه این نمودار و جدول ۴-۱۳ مشاهده می‌شود که مقادیر گشتاور اعمالی برای هر دو پیچ اصلی و ساخته شده تقریباً به مقدار $N.m$ ۴۰ کاهش یافته است. این در شرایطی می‌باشد که از پیچ‌های مشابه و رزوه سوراخ یکسان استفاده شده است. دلیل افزایش 20 kN نیروی همبندی در پیچ‌های یاتاقانی، می‌تواند وجود پوشش نو بر روی پیچ‌های ساخته شده و عدم پوشش پیچ‌های اصلی باشد. گشتاور باز کردن پیچ‌های یاتاقان کپه و پیچ‌های سرسیلندر اصلی در جدول ۴-۱۵ بیان شده است.

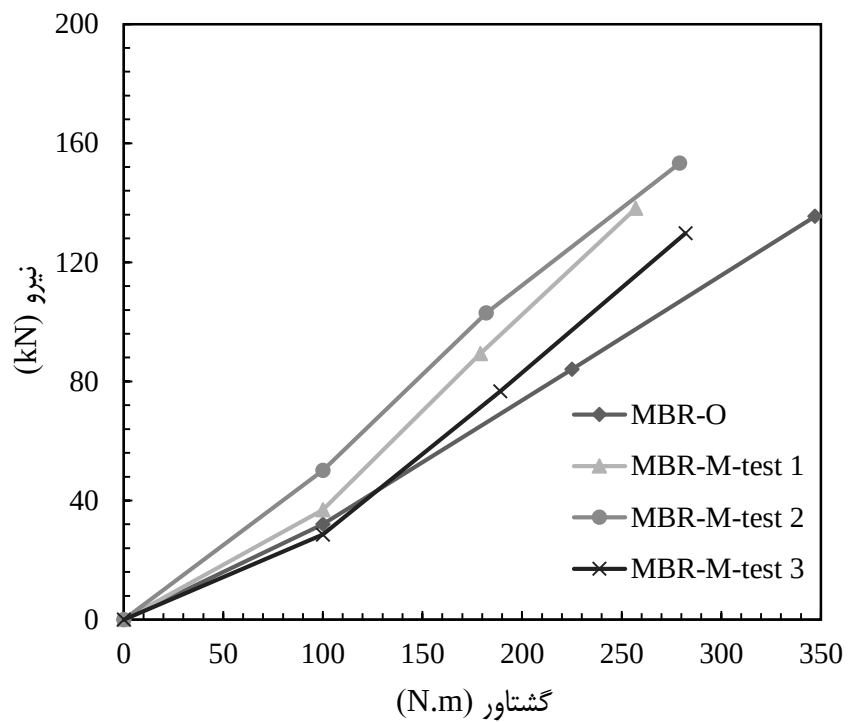
جدول ۴-۱۵ گشتاورهای بازکردن پیچ‌های اصلی و ساخته شده آزمون دوم

ردیف	پیچ	گشتاور باز کردن (N.m)
پیچ‌های یاتاقان کپه	MBR-O-1	۲۷۴
	MBR-O-2	۲۵۹
	MBR-M-1	۲۲۷
	MBR-M-2	۲۳۷
پیچ‌های کوتاه سرسیلندر	CHS-O-1	۴۱۸
	CHL-O-2	۳۶۲
	CHL-M-1	۳۸۱
	CHL-M-2	۳۳۲
پیچ‌های بلند سرسیلندر	CHS-O-2	۵۲۶
	CHL-O-3	۴۴۹
	CHL-M-2	۳۷۰
	CHL-M-3	۳۹۳

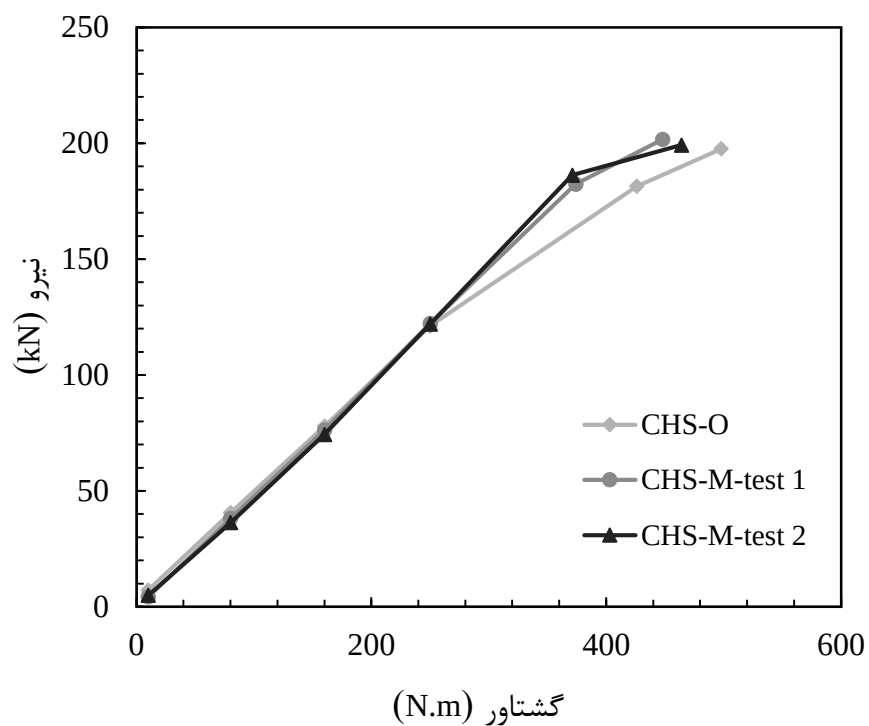
۴-۳-۳ آزمون اندازه‌گیری همزمان نیروی پیش‌بار و تغییر طول پیچ با استفاده از روش

اولتراسونیک (آزمون سوم)

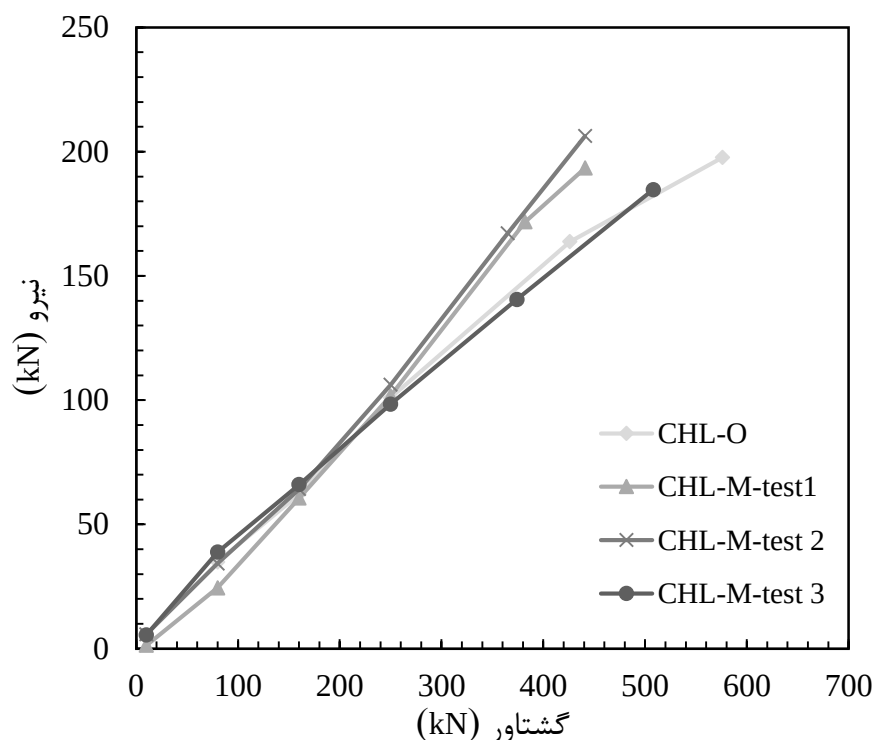
بر اساس آزمون‌های انجام شده برای پیش‌بینی رفتار و محاسبه ضریب اصطکاک دقیق پیچ، آزمون مرحله دوم با پیچ‌های ساخته شده نو تکرار شد. در این آزمون پیچ‌ها در سه مرحله همبندی می‌شوند که در مرحله سوم پوشش فسفات روی آنها حذف می‌شود. در این آزمون علاوه بر اندازه‌گیری نیرو و گشتاور، مقدار تغییرات طولی پیچ‌ها توسط دستگاه اولتراسونیک نیز خوانش شد. از شکل ۴-۱۱ شکل ۴-۱۳ اثر تعداد دفعات بستن بر روی نیروی همبندی و گشتاور مورد نیاز در مراحل مختلف نشان داده شده است. در آزمون پیچ کوتاه سرسیلندر به دلیل مشکلات فنی پوشش پیچ در مرحله دوم حذف و آزمون تکرار شد.



شکل ۴-۱۱ نمودار نیروی همبندی و گشتاور پیچ یاتاقان کپه



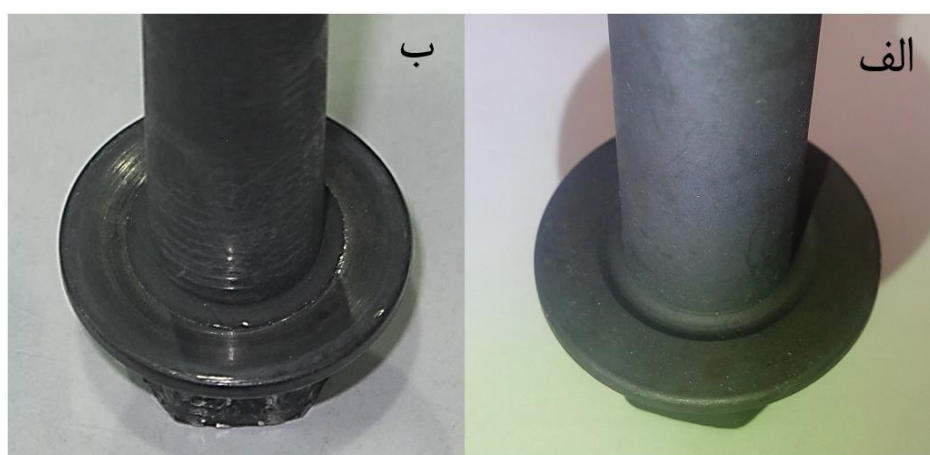
شکل ۴-۱۲ نمودار نیروی همبندی و گشتاور پیچ کوتاه سرسیلندر



شکل ۴-۱۳ نمودار نیروی همبندی و گشتاور پیچ بلند سرسیلندر

همان‌طور که مشخص است در آزمون اول پیچ‌های ساخته شده، مقدار نیروی همبندی نسبت به نیروی همبندی مرحله دوم کمتر است. زمانی که پیچ برای اولین بار همبندی می‌شود به خاطر ایجاد تنش لهیدگی اضافی در زیر قسمت گل پیچ، وجود سطوح زبر و همچنین نبود سطوح تکیه‌گاهی مناسب، نقطه تسلیم موضعی تشکیل می‌شود. همچنین بارها نمی‌توانند به‌طور مساوی بر روی رزوه‌های اتصال توزیع شوند و به همین خاطر نیز ممکن است مقداری از گشتاور اعمالی صرف تغییر شکل پلاستیک در رزوه‌ها شود؛ بنابراین همان‌طور که در شکل‌ها نشان داده شده است تا ۱۰٪ کاهش مقدار نیروی همبندی اولیه در پیچ‌ها مشاهده شد. این پدیده می‌تواند در همبندی اول تمام پیچ‌های نو اتفاق افتد. در آزمون دوم پیچ‌های ساخته شده به دلیل شکل‌گیری رزوه‌ها در مرحله قبل، نیروی همبندی افزایش خواهد یافت. از طرفی پس از هر بار همبندی سطح زیر گل پیچ ساییده و سبب برهم خوردن صافی سطح و افزایش ضریب اصطکاک در زیر گل پیچ می‌شود (شکل ۴-۱۴). مقدار درصد افزایش گشتاور برای غلبه بر ضریب اصطکاک اضافی با اعمال زاویه و در نظر نگرفتن گشتاور ورودی می‌تواند با صرف گشتاور بیشتر به نیروی همبندی مشخص برسد. در مرحله دوم همبندی صافی سطح زیر گل پیچ هنوز به‌صورت

کامل برهم نخورده است. از طرفی نیروی همبندی و ضریب اصطکاک تنها به تغییرات اصطکاک زیر گل پیچ وابسته نمی‌باشد. این پدیده معمولاً تا مرحله چهارم همبندی از جدول ۲-۳ اتفاق می‌افتد. در مرحله همبندی پنجم و ششم، مستقل از گشتاور اعمالی، پیچ‌ها با زاویه مشخصی بسته می‌شوند که این عمل سبب حفظ نیروی همبندی پیچ در محدوده مجاز نیروی همبندی سرسیلندر می‌شود. این در حالی است که نیروی همبندی کل مستقل از نیروی همبندی اعمال شده با گشتاورها آچار ساده نمی‌باشد. نیروهای همبندی با آچار ساده وابسته به ضریب اصطکاک است که با افزایش ضریب اصطکاک نیروی همبندی تا مرحله قبل از اعمال زاویه کاهش خواهد یافت. عدم استفاده از پوشش نیز سبب افزایش اصطکاک و در نهایت کاهش نیروی همبندی می‌شود. گشتاورهای اعمالی از جدول ۲-۳ باید به حدی زیاد باشد که با افزایش ضریب اصطکاک پیچ‌ها از نقطه *Sung* عبور کرده تا نیروی همبندی تکرارپذیری اعمال شود (شکل ۲-۱۶). روش کنترل زاویه همبندی در ناحیه الاستیک (پیچ‌های یاتاقان کپه) یا الاستیک-پلاستیک (پیچ‌های سرسیلندر) استفاده می‌شود. روش کنترل زاویه پلاستیک معمولاً در مقایسه با روش کنترل زاویه الاستیک قابلیت اعمال نیروی محوری F_b با دقت بالای را دارد [۳]. از دیدگاه عملی روش کنترل زاویه الاستیک در گیر پراکندگی از نیروی محوری پیچ می‌باشند که این پدیده در همبندی پیچ‌های یاتاقان کپه مشخص است (شکل ۴-۱۱).



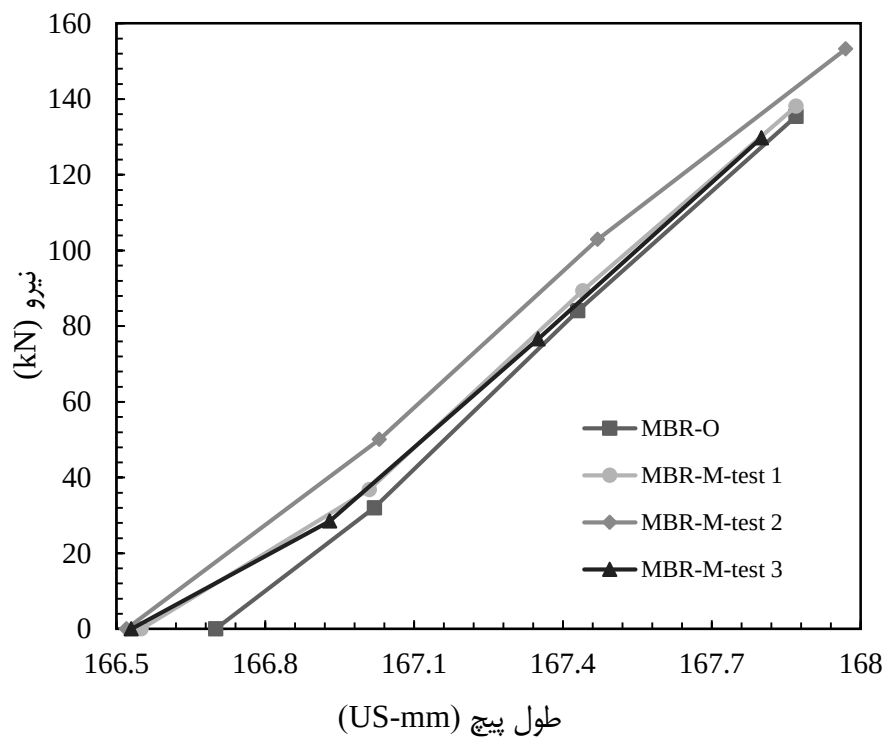
شکل ۴-۱۴ تغییرات زبری سطح زیر گل پیچ (الف) قبل از همبندی (ب) بعد از همبندی

در همبندی مرحله سوم ضریب اصطکاک با برهم خوردن شرایط صافی سطح زیر گل و زبری سطوح روزه‌ها به دلیل حذف پوشش، افزایش می‌یابد که در نهایت سبب کاهش نیروی همبندی می‌شود. گشتاور بازکردن پیچ‌های یاتاقان کپه و سرسیلندر در جدول ۴-۱۶ بیان شده است. بر اساس نتایج گشتاور باز کردن پیچ‌ها، نیروی همبندی پیچ‌ها تنها عامل تعیین کننده گشتاور باز کردن نمی‌باشد. همان‌طور که مشخص است با افزایش تعداد مراحل همبندی گشتاور باز کردن پیچ‌ها نیز افزایش می‌یابد. این در صورتی می‌باشد که اگر نیروی محوری تنها عامل تعیین کننده بود باید گشتاور باز کردن پیچ در همبندی نهایی نسبت به سایر مراحل کمتر باشد. در آزمون همبندی اول پیچ‌های ساخته شده، گشتاور اعمالی به دلیل مقاومت به تغییر شکل پلاستیک رزوه‌ها به صورت تنش پیچشی در پیچ ذخیره می‌شود که در هنگام باز کردن سبب کاهش گشتاور مورد نیاز می‌شود. در مرحله دوم رزوه‌ها شکل گرفته و تنش‌های پیچشی پیچ کمتر است و در نهایت گشتاور باز کردن پیچ افزایش می‌یابد. از آنجاکه ضریب اصطکاک کل μ_m را به صورت ضریب اصطکاک ناحیه رزوه‌های درگیر μ_t و ضریب اصطکاک زیر گل پیچ μ_u بررسی می‌شود، در آزمون اول ضریب اصطکاک رزوه‌ها نسبت به آزمون سوم که پوشش پیچ حذف شده، بیشتر است و در آزمون دوم ضریب اصطکاک زیر گل پیچ تعیین کننده ضریب اصطکاک کل است. گشتاور باز کردن پیچ‌های آزمون سوم نیز نتایج مشابهی را نشان داد (جدول ۴-۱۶).

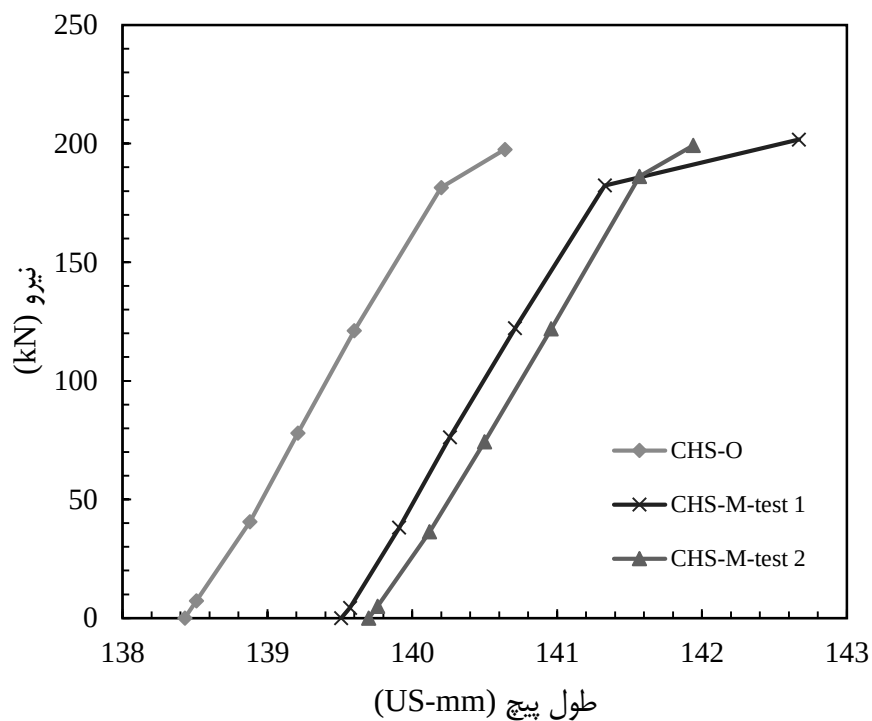
جدول ۴-۱۶ گشتاورهای باز کردن پیچ‌های اصلی و ساخته شده آزمون سوم

ردیف	پیچ	گشتاور باز کردن (N.m)
پیچ‌های یاتاقان کپه	MBR-O	۳۰۷
	MBR-M-test 1	۲۳۲
	MBR-M-test 2	۲۴۷
	MBR-M-test 3	۲۴۸
پیچ‌های کوتاه سرسیلندر	CHS-O	۴۱۳
	CHS-M-test 1	۳۶۰
	CHS-M- test 2	۳۸۱
پیچ‌های بلند سرسیلندر	CHL-O	-
	CHL-M-test 1	۳۵۰
	CHL-M-test 3	۳۵۱
	CHL-M-test 3	۴۰۹

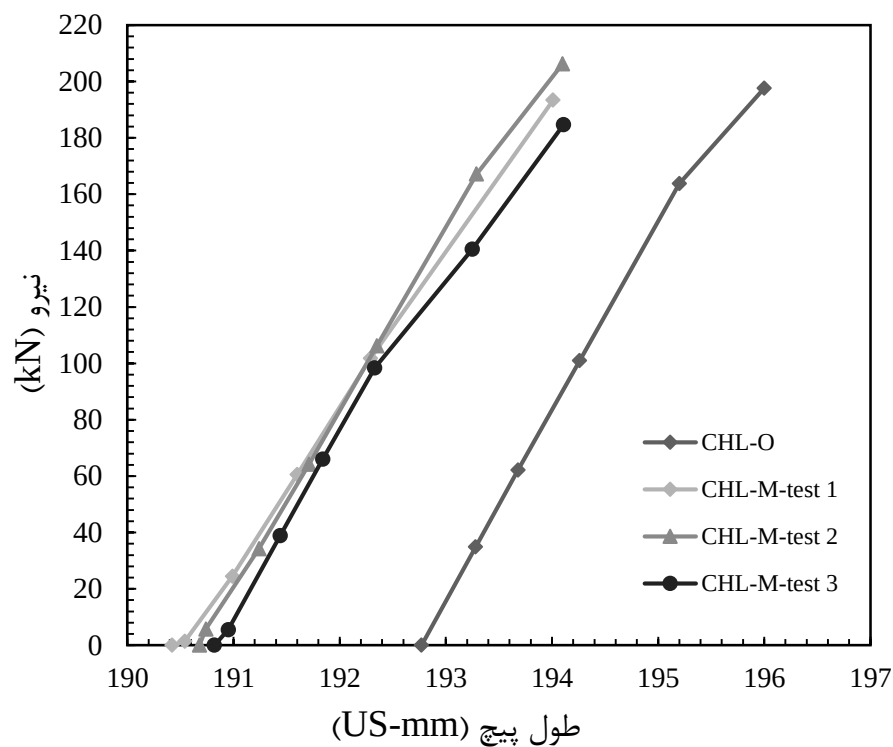
در شکل ۴-۱۵ تا شکل ۴-۱۷ نمودار نیروی همبندی و اندازه‌گیری تغییر طول پیچ (US-mm) با دستگاه اولتراسونیک نشان داده شده است. بر اساس نتایج به دست آمده عدم صحت تغییرات طولی پیچ و وابسته بودن سرعت موج به تنش مشهود است؛ بنابراین براساس نتایج شکل‌ها نمی‌توان به جمع‌بندی درستی دست یافت. در تمامی مراحل آزمون هر پیچ قبل و بعد از همبندی با کولیس دیجیتال اندازه‌گیری و تغییر شکل پلاستیک طول اولیه L_0 پیچ ثبت شد. همچنین پس از هر مرحله همبندی، پیچ با دستگاه اولتراسونیک اندازه‌گیری مجدد شد تا از صحت کالیبراسیون و عدم ایجاد تنش پس‌ماند در پیچ اطمینان حاصل شود.



شکل ۴-۱۵ نمودار نیروی همبندی و تغییرات طول پیچ یاتاقان کپه



شکل ۴-۱۶ نمودار نیروی همبندی و تغییرات طول پیچ کوتاه سرسیلندر



شکل ۴-۱۷ نمودار نیروی همبندی و تغییرات طول پیچ بلند سرسیلندر

جدول ۴-۱۷ تغییر طول اولتراسونیک پیچ‌ها را در فرایند همبندی با تغییر طول واقعی پیچ بر اساس نیروی کشش مقایسه می‌کند. همچنین تغییر طول پلاستیک پیچ پس از فرایند همبندی که با کولیس اندازه‌گیری شده است، در این جدول آورده شده است. همان‌طور که در نشان داده شده است، استحکام ۲/۰٪ برای نمونه آزمون کشش پیچ‌های سرسیلندر ۱۲۱۱ MPa و برای پیچ یاتاقان کپه ۱۲۳۴ MPa می‌باشد.

جدول ۴-۱۷ تغییرات طول پیچ‌ها

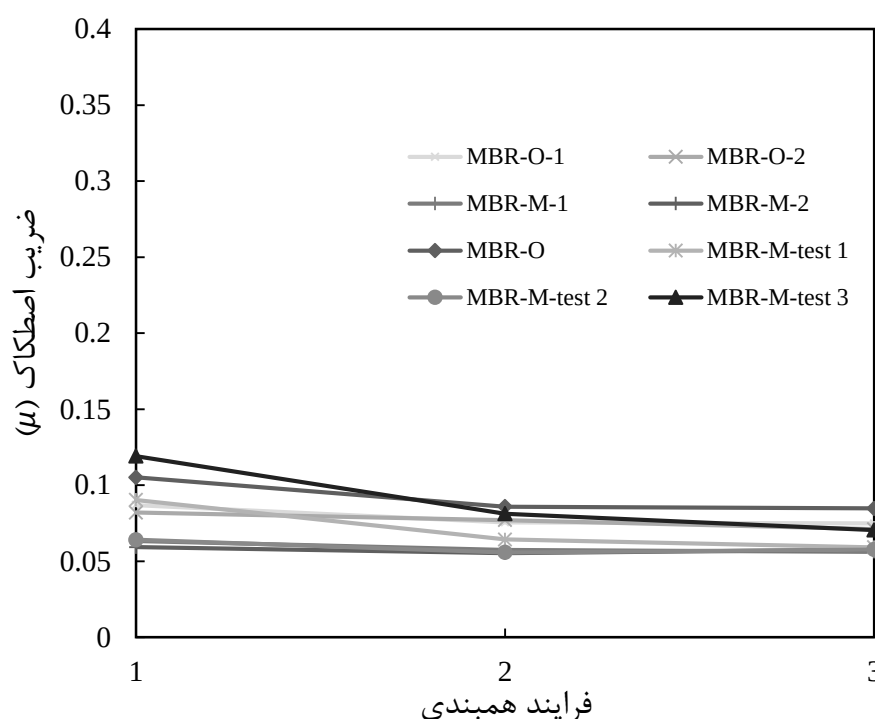
ردیف	پیچ	تغییر طول اولتراسونیک (US-mm)	تغییر طول واقعی (mm)	تغییر طول پلاستیک (mm)
پیچ‌های یاتاقان کپه	MBR-O	۱/۱۷	۰/۴۴	۰
	MBR-M-test 1	۰/۸۹	۰/۴۵	۰
	MBR-M-test 2	۰/۸۹	۰/۵	۰
	MBR-M-test 3	۰/۸۸	۰/۴۲	۰
پیچ‌های کوتاه سرسیلندر	CHS-O	۲/۱۷	۰/۵۳	۰/۲
	CHS-M-test 1	۳/۱۷	۰/۵۵	۰/۲۷
	CHS-M- test 2	۲/۱۷	۰/۵۳	۰/۲۶
پیچ‌های بلند سرسیلندر	CHL-O	۳/۲۳	۰/۸۱	۰/۲۸
	CHL-M-test 1	۳/۵۲	۰/۸۴	۰/۲۶
	CHL-M-test 3	۳/۴۲	۰/۹۳	۰/۱۴
	CHL-M-test 3	۳/۲۴	۰/۷۷	۰/۰۲

همان‌طور که قبلاً نیز ذکر شده، همبندی پیچ‌های یاتاقان کپه در محدوده الاستیک می‌باشد و هیچ گونه تغییر شکل پلاستیکی مشاهده نشد؛ اما در پیچ بلند سرسیلندر حداکثر تنش اعمالی محوری به پیچ در مراحل اول تا سوم به ترتیب برابر $1115/6 \text{ MPa}$ ، $1231/6 \text{ MPa}$ و $1104/9 \text{ MPa}$ است. با مقایسه شکل ۴-۱۳ و جدول ۴-۱۷ می‌توان دریافت که در آزمون اول نسبت به آزمون دوم گشتاور بیشتری اعمال شده است اما تنش محوری در آزمون اول نسبت به آزمون دوم کمتر و در محدوده زیر تنش تسلیم است. این پدیده در حالی اتفاق می‌افتد که در جدول ۴-۱۷ تغییر شکل پلاستیک در آزمون اول نسبت به آزمون دوم بیشتر است. دلیل مشاهده این پدیده وجود ضریب اصطکاک بزرگتر رزوه‌ها در مرحله اول همبندی می‌باشد که باعث اعمال تنش پیچشی بزرگتر در آزمون اول نسبت به آزمون دوم می‌شود؛ بنابراین به دلیل عدم تقسیم مساوی بارها بر روی رزوه‌های اتصال مقداری از گشتاور اعمالی صرف تغییر شکل پلاستیک در رزوه‌ها شده و در نهایت نیروی همبندی کمتری نسبت به آزمون دوم توسط پیچ اعمال شد. در آزمون دوم علاوه بر افزایش تنش محوری (بیشتر از استحکام تسلیم)، به دلیل

شکل گرفتن مناسب و کار سخت شدن رزوه‌ها، مقادیر تغییر شکل پلاستیک و ضریب اصطکاک کاهش و نیروی محوری اعمالی توسط پیچ افزایش یافت. عدم وجود پوشش فسفات روی و برهم خوردن صافی سطح زیر گل پیچ در آزمون سوم باعث افزایش ضریب اصطکاک شد و مقادیر بیشتری از گشتاور برای غلبه بر اصطکاک صرف شد. در نتیجه مقدار نیروی همبندی تا مقدار کمتر از نقطه تسلیم کم شد و تغییر طول همبندی و تغییر طول پلاستیک آن نیز کاهش یافت. در همبندی مرحله اول پیچ کوتاه سرسیلندر رفتار مشابه است اما در همبندی مرحله دوم پوشش فسفات روی پیچ حذف شد. در این شرایط مجموع ضریب اصطکاک رزوه‌ها و زیر گل پیچ از ضریب اصطکاک کل پیچ نسبت به مرحله اول افزایش یافته است؛ بنابراین در مرحله دوم همبندی مقدار گشتاور افزایش یافت و با وجود افزایش گشتاور مشاهده شد که مقدار نیروی همبندی مرحله دوم مقداری کم شده است. این امر نشان دهنده وجود تنش پیچشی بزرگتر نسبت به مرحله اول است که در نهایت تنش کل در المان‌های موضعی پیچ از تنش‌های مرحله اول بیشتر است و با وجود تغییر شکل‌های پلاستیک در مرحله اول همبندی، مقدار زیادی تغییر شکل پلاستیک رخ داد (مقدار تغییر شکل پلاستیک در مرحله دوم همبندی با وجود اعمال تنش‌های بزرگتر نسبت به مرحله قبل کاهش یافت که دلیل آن کار سخت شدن پیچ در مرحله اول است).

۴-۴- محاسبه ضریب اصطکاک

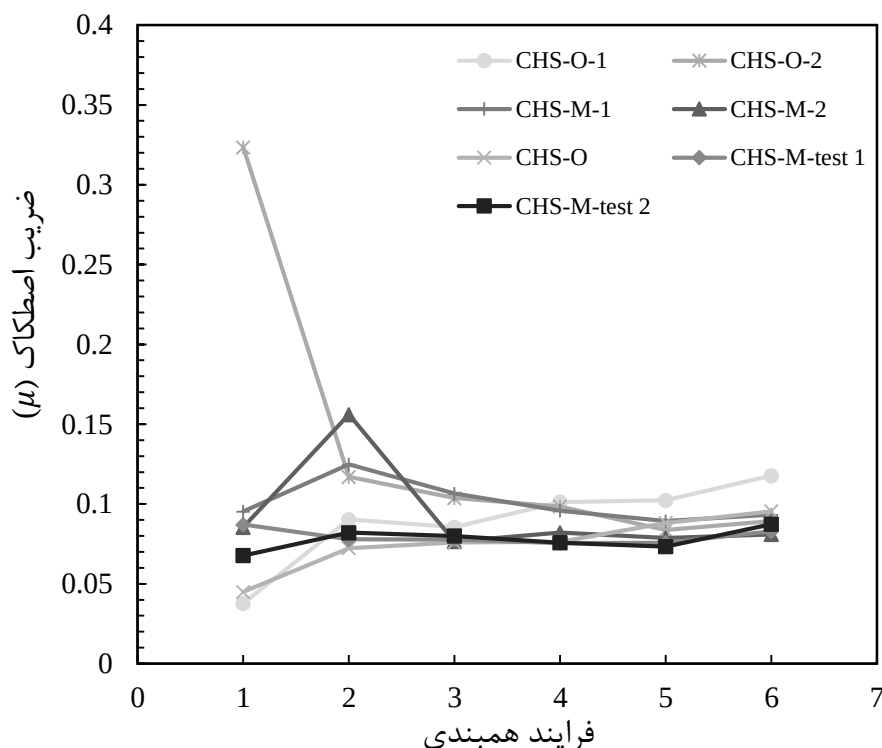
به منظور تعیین ضریب اصطکاک کلی از معادله ۲۲ نیاز به اندازه‌گیری گشتاور T و نیروی همبندی F_v است که بر اساس فرایند بستن از جدول ۳-۲ توسط آچار گشتاور-زاویه و واشر نیروسنج اندازه‌گیری شد. مقادیر ضریب اصطکاک در مراحل مختلف همبندی یکسان نیست و برای هر پیچ در هر مرحله محاسبه می‌شود. به منظور مقایسه بهتر ضرایب اصطکاک کل (μ_m)، نتایج دو آزمون (نتایج آزمون همبندی دوم پیچ‌های کارکرده و نتایج آزمون سوم) برای هر پیچ در یک نمودار نشان داده شده است (شکل ۴-۱۸ تا شکل ۴-۲۰).



شکل ۴-۱۸ نمودار ضریب اصطکاک و فرایند بستن پیچ یاتاقان کپه

شکل ۴-۱۸ نمودار ضریب اصطکاک محاسبه شده برای پیچ‌های یاتاقان کپه را نشان می‌دهد. در آزمون همبندی دوم مشاهده شد که مقادیر ضریب اصطکاک پیچ‌های اصلی (MBR-O-1, MBR-O-2) 0.02 الی 0.03 بیشتر از پیچ‌های ساخته شده کارکرده (MBR-M-1, MBR-M-2) است. در آزمون سوم ضریب اصطکاک پیچ اصلی (MBR-O) در محدوده پیچ‌های اصلی آزمون دوم (MBR-O-1, MBR-O-2) است. در این آزمون مشاهده شده که رفتار پیچ نو (MBR-M-test 1) ساخته شده در ابتدای فرایند همبندی به خاطر وجود سطوح زبر و نبود سطوح تکیه‌گاهی مناسب و همچنین تغییر شکل پلاستیک دارای ضریب اصطکاکی در محدوده پیچ‌های اصلی داشته که به تدریج رو به کاهش است. در همبندی مرحله دوم پیچ ساخته شده در آزمون سوم (MBR-M-test 2) رفتار کاملاً مشابه پیچ‌های ساخته شده در آزمون دوم (MBR-M-1, MBR-M-2) است که به جز در نظر گرفتن پوشش دارای شرایط و تعداد دفعات همبندی مشابهی هستند. در همبندی مرحله سوم این پیچ (MBR-M-test 3) مشاهده شد که

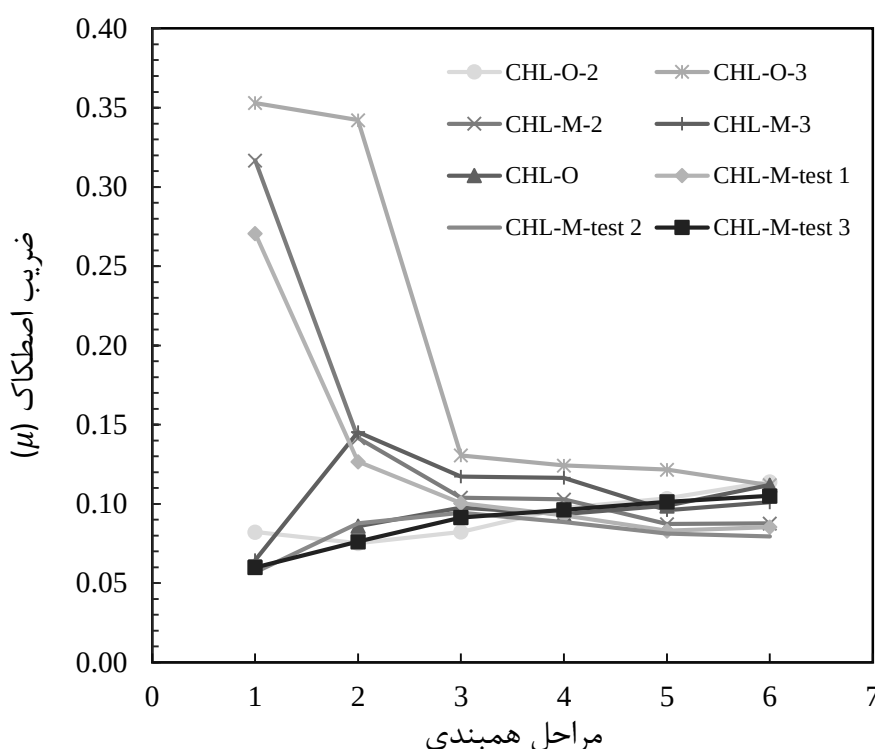
به دلیل افزایش زبری زیر گل پیچ و پاک کردن پوشش مقدار ضریب اصطکاک پیچ در محدوده پیچ‌های اصلی قرار می‌گیرد.



شکل ۴-۱۹ نمودار ضریب اصطکاک-فرایند بستن پیچ کوتاه سرسیلندر

در شکل ۴-۱۹ نمودار ضریب اصطکاک محاسبه شده برای پیچ‌های کوتاه سرسیلندر نشان داده شد. در همبندی پیچ‌های کوتاه و بلند سرسیلندر گشتاور فرایند همبندی از ۱۰ N.m شروع می‌شود. اندازه‌گیری دقیق اثر گشتاورهای کم بر روی نیروی همبندی دشوار است و از طرفی وجود هر گونه براده و یا کثیفی بر روی نیروی همبندی اثر بزرگی می‌گذارد. اثر این پدیده را در همبندی دو پیچ اصلی در آزمون دوم مشاهده می‌شود که با عدم در نظر گرفتن ضریب اصطکاک محاسبه شده در گشتاور ۱۰ N.m محدوده ضریب اصطکاک برای پیچ‌های اصلی در این آزمون (CHS-O-1, CHS-O-2) بین ۰/۰۹ تا ۰/۱۱ بود. مقدار ضریب اصطکاک پیچ ساخته شده (CHS-M-1) که در سه مرحله همبندی شده و فاقد پوشش بود، در همبندی آزمون دوم رفتاری کاملاً مشابه پیچ‌های اصلی از خود نشان داد. همان‌طور که مشخص است ضریب اصطکاک پیچ ساخته شده نو (CHS-M-2) در این آزمون نسبت به پیچ‌های کارکرده کمتر است. در آزمون سوم پیچ اصلی (CHS-O) تا مرحله اعمال زاویه، ضریب اصطکاک کمتری را نشان داد

اما در نهایت ضریب اصطکاک در دو زاویه نهایی برابر با پیچ‌های اصلی آزمون دوم می‌باشد. در ادامه مقدار ضریب اصطکاک پیچ ساخته شده نو (CHS-M-test 1) محاسبه شده که مقدار ضریب اصطکاک کمتری نسبت به پیچ‌های اصلی از خود نشان داد که در مرحله دوم همبندی به دلیل حذف پوشش مقدار ضریب اصطکاک آن مقداری کاهش یافت اما رفتار مشابهی با همبندی مرحله قبل از خود نشان داد که در نهایت نیروهای همبندی مشابهی را نیز اعمال کرد.



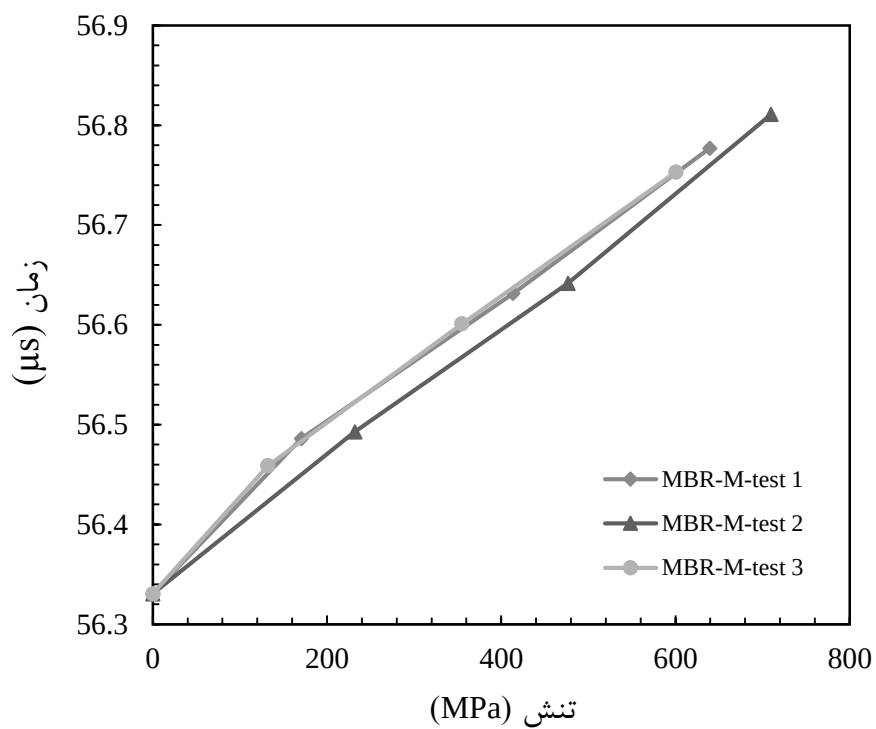
شکل ۴-۲۰ نمودار ضریب اصطکاک-فرایند بستن پیچ بلند سرسیلندر

در بررسی ضریب اصطکاک پیچ‌های بلند سرسیلندر رفتار تقریباً شبیه پیچ‌های کوتاه سرسیلندر می‌باشد. همان‌طور که در شکل ۴-۲۰ نشان داده شده، محاسبه ضریب اصطکاک در گشتاورهای کوچک دشوار است. در پیچ‌های اصلی آزمون دوم (CHL-O-2, CHL-O-3) رفتار همگرایی مشاهده می‌شود. از آنجاکه نیروی همبندی کل برابر مجموع نیروی همبندی هر مرحله می‌باشد، بنابراین به دلیل ضریب اصطکاک کم پیچ (CHL-O-2) مقدار نیروی همبندی بیشتری نسبت به پیچ (CHL-O-3) اعمال می‌کند. در همبندی پیچ‌های ساخته شده کارکرده (CHL-M-2, CHL-M-3) پدیده تفاوت ضریب اصطکاک در

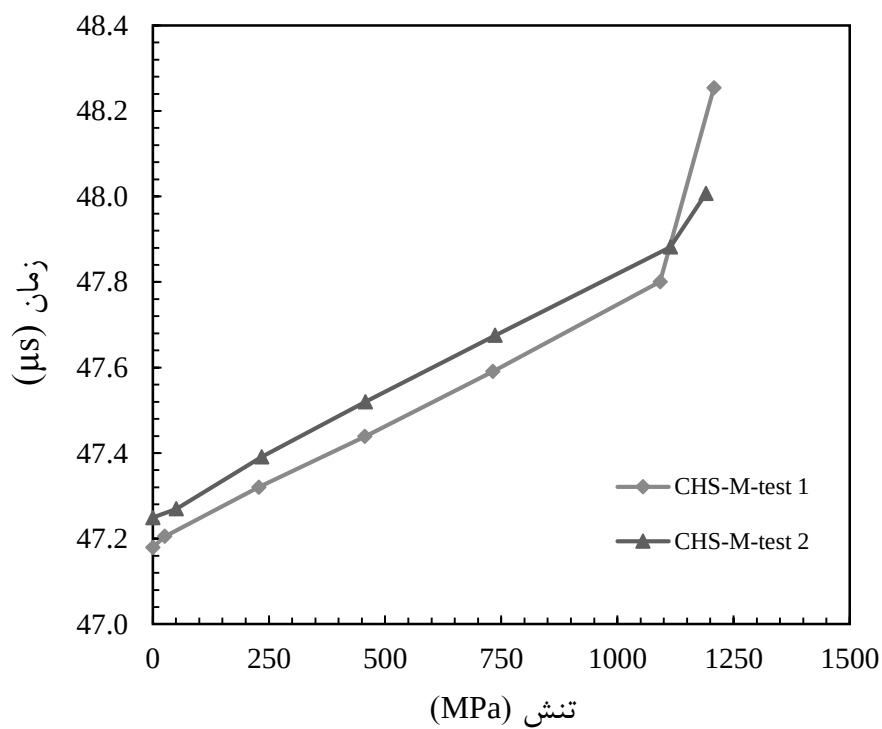
مراحل اول مشاهده می‌شود که با عدم در نظر گرفتن آنها، دامنه ضریب اصطکاک پیچ‌های ساخته شده کارکرده و پیچ‌های اصلی در آزمون دوم بین ۰/۰۹ تا ۰/۱۱ است. در آزمون سوم رفتار پیچ اصلی (CHL-O) مشابه پیچ اصلی (CHL-O-2) می‌باشد که به دلیل ضریب اصطکاک بیشتر تا مرحله سوم اعمال گشتاور ۱۶۰ N.m، مقدار نیروی کل اعمالی پیچ اصلی در این آزمون نسبت به پیچ ذکر شده در آزمون دوم کمتر است. پیچ ساخته شده در آزمون سوم (CHL-M-test 1) به دلیل وجود سطوح زبر و همچنین تغییر شکل پلاستیک رزوه‌ها دارای رفتاری مشابه پیچ کارکرده (CHL-M-2) است اما مقدار ضریب اصطکاک آن نسبت به پیچ کارکرده بدون پوشش آزمون دوم کمتر است.

۴-۵- محاسبات اولتراسونیک

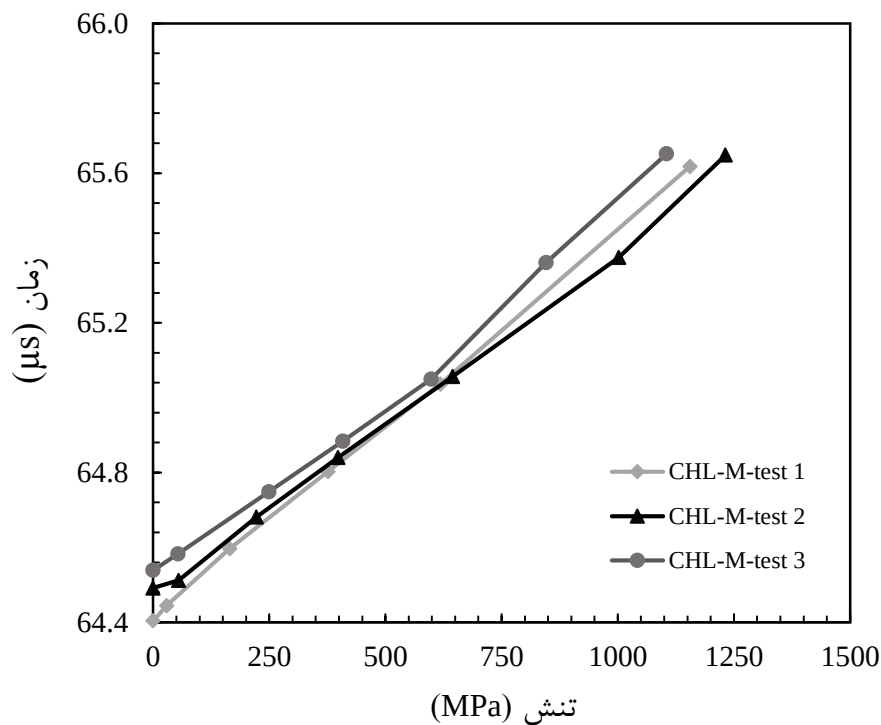
در این مطالعه طول پیچ با روش اندازه‌گیری اولتراسونیک Pulse-echo براساس تغییرات سرعت موج اولتراسونیک و اندازه‌گیری زمان انتشار موج از معادله ۳۱ به دست آمد. با قرار دادن سرعت موج اولتراسونیک ($C_0 = V_0$) در تنش صفر و طول خوانده شده (L) از دستگاه اولتراسونیک (US-mm) می‌توان زمان انتشار موج (T) را در پیچ تحت تنش محاسبه کرد. سرعت اولیه موج اولتراسونیک با دانستن طول پیچ در تنش صفر از دستگاه اولتراسونیک ۵۹۱۶,۳ m/s اندازه‌گیری شد. با محاسبه زمان انتشار موج و دانستن تغییرات طول واقعی پیچ در تنش‌های همبندی می‌توان سرعت موج اولتراسونیک را محاسبه کرد. عدم تغییرات سرعت موج اولتراسونیک پس از هر مرحله همبندی به‌منظور اطمینان از وجود تنش پسماند در پیچ مورد بررسی قرار گرفت که تغییری مشاهده نشد. شکل ۴-۲۱ تا شکل ۴-۲۳ نتایج آزمون همبندی پیچ یاتاقان کپه، پیچ کوتاه و بلند سرسیلندر آزمون سوم را براساس زمان انتشار موج اولتراسونیک بر حسب تنش اعمالی را نشان می‌دهد. تنش به‌صورت مرحله‌ای و بر اساس مراحل همبندی پیچ افزایش یافت.



شکل ۴-۲۱ تغییرات زمان انتشار موج اولتراسونیک نسبت به تنش در پیچ یاتاقان کپه

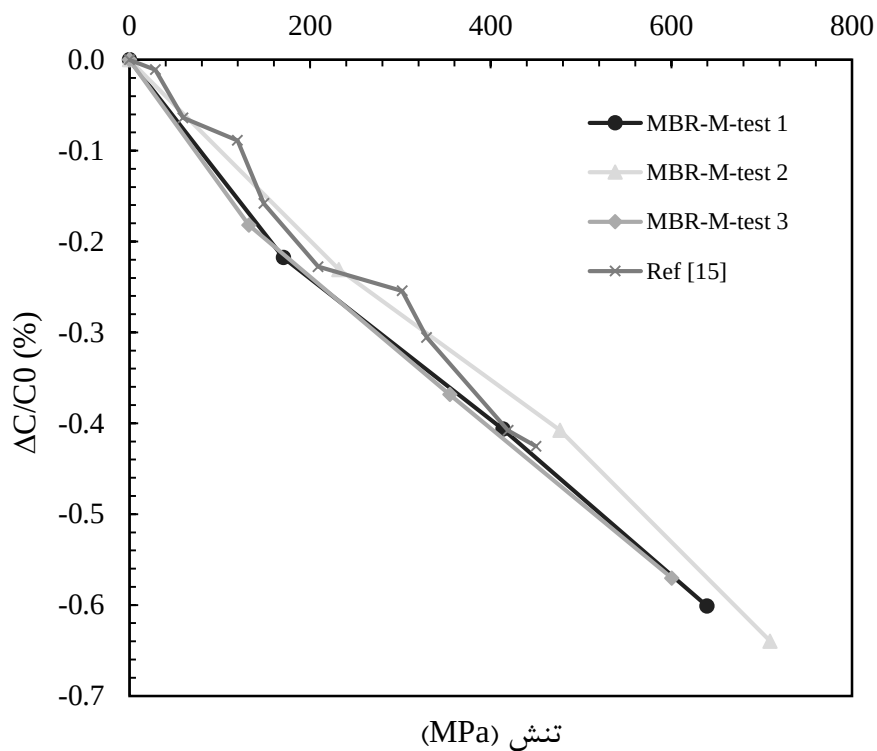


شکل ۴-۲۲ تغییرات زمان انتشار موج اولتراسونیک نسبت به تنش در پیچ کوتاه سرسیلندر

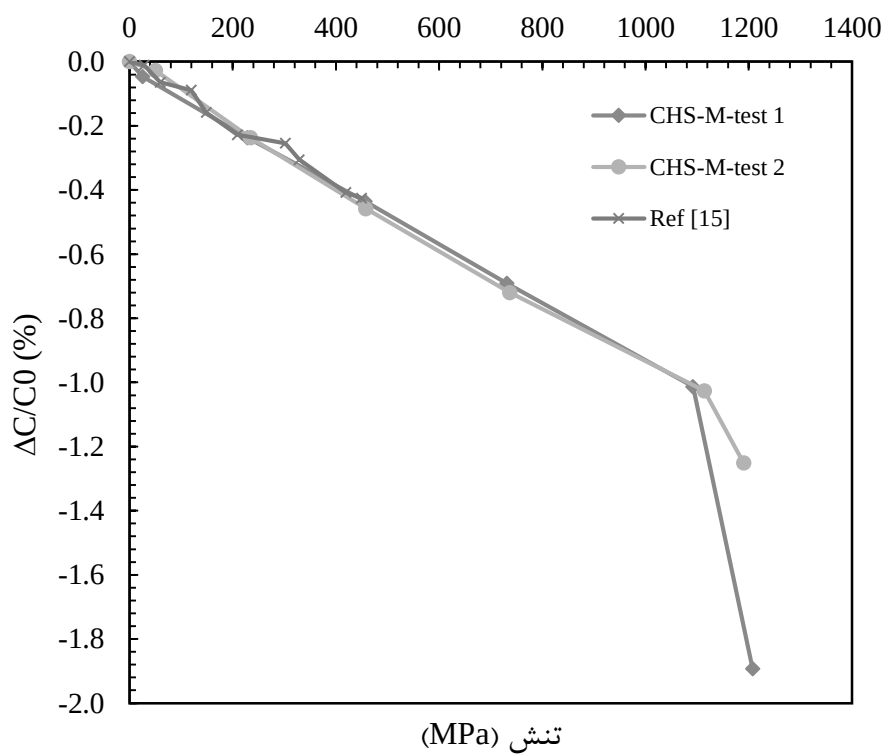


شکل ۴-۲۳ تغییرات زمان انتشار موج اولتراسونیک نسبت به تنش در پیچ بلند سرسیلندر

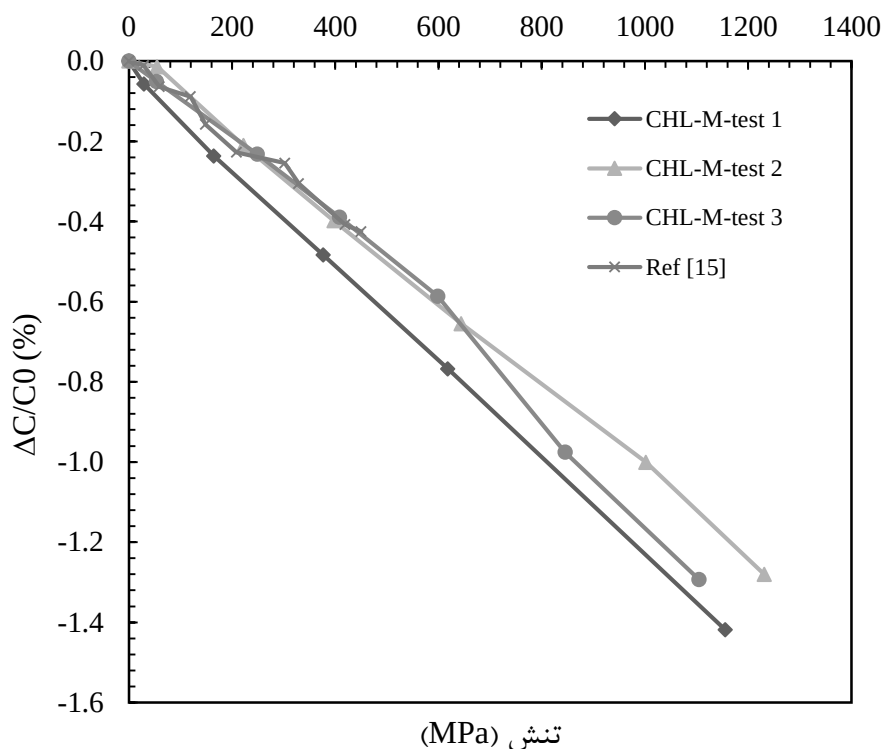
با افزایش طول پیچ (L_0) به دلیل نیروهای کشش اعمالی، زمان انتشار موج اولتراسونیک افزایش می‌یابد. ولی با افزایش تنش در پیچ‌ها، زمان انتشار موج افزایش و سرعت ظاهری موج اولتراسونیک کاهش می‌یابد. با محاسبه تغییرات سرعت ظاهری می‌توان از معادله ۳۲ سرعت موج اولتراسونیک (C) را به دست آورد. نسبت تغییرات سرعت حقیقی نسبت به تنش‌های همبندی به ترتیب برای پیچ یاتاقان کپه، پیچ کوتاه و بلند سرسیلندر در شکل ۴-۲۴ تا شکل ۴-۲۶ نشان داده شده است. نتایج حاصل از آزمون‌های انجام شده با نتایج مرجع [۱۵] مقایسه شد که برای پیچ‌هایی که در شرایط اعمال تنش‌های محوری بیشتر نسبت به تنش‌های پیچشی بودند، تطابق خوبی داشت. البته نتایج مرجع [۱۵] در نیروهای کششی کمتر، تنش محوری خالص و پیچ M16 کلاس ۱۰,۹ انجام شده است.



شکل ۴-۲۴ نمودار تغییرات سرعت موج اولتراسونیک نسبت به تنش پیچ یاتاقان کپه



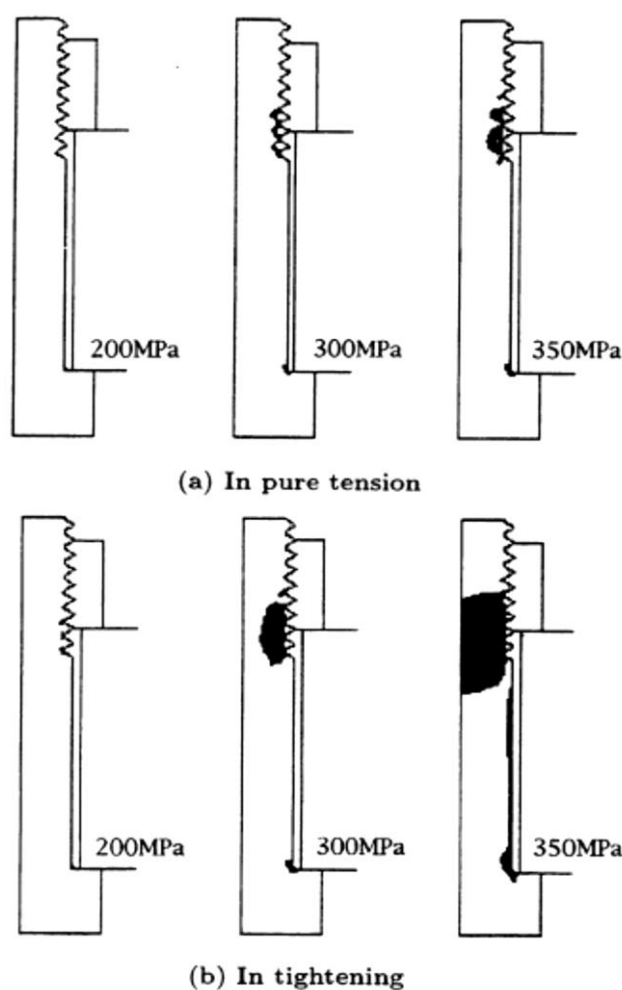
شکل ۴-۲۵ نمودار تغییرات سرعت موج اولتراسونیک نسبت به تنش پیچ کوتاه سرسیلندر



شکل ۴-۲۶ نمودار تغییرات سرعت موج اولتراسونیک نسبت به تنش پیچ بلند سرسیلندر

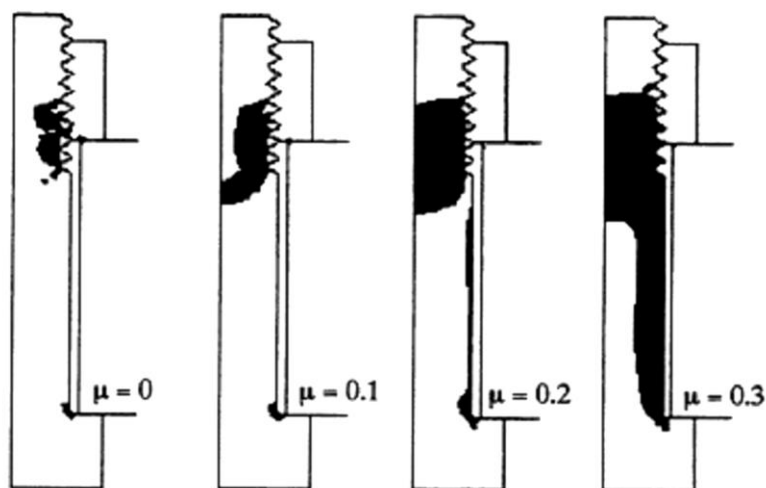
همان طور که از معادله ۳۰ و ۳۳ انتظار می‌رفت سرعت موج اولتراسونیک در محدوده الاستیک به طور خطی به تنش در ماده، چگالی و مدول الاستیک وابسته می‌باشد. بر اساس نتایج به دست آمده از اعمال تنش و اندازه‌گیری تغییرات سرعت موج اولتراسونیک به پیچ، مدول الاستیک و یا چگالی فولاد تغییر می‌کند که این تغییرات سبب تغییر سرعت انتشار موج می‌شود. تغییرات سرعت موج اولتراسونیک در حالت انتشار موج طولی احتمالاً مستقل از تغییرات مدول الاستیک و وابسته به تغییرات چگالی می‌باشد [۱۳، ۴۳]. اتصالات پیچ به دلیل شکل هندسی پیچیده در معرض تمرکز تنش‌های بالایی در ریشه رزوه‌ها می‌باشند. نواحی تغییر شکل پلاستیک در اطراف ریشه رزوه‌ها حتی در نیروهای محوری نسبتاً کم نیز شکل می‌گیرد. ناحیه مشکی رنگ در شکل ۴-۲۷ نشان‌دهنده آن است که افزایش گشتاور بستن بر روی توزیع ناحیه تغییر شکل پلاستیک اثر بسیار زیادی دارد. در ابتدا ناحیه پلاستیک در اطراف ریشه رزوه‌های اول در سطح جدایش مهره شکل می‌گیرد. با افزایش گشتاور ناحیه پلاستیک از قسمت خارجی به سمت محور پیچ گسترش می‌یابد؛ بنابراین بررسی اثر تغییر شکل پلاستیک بسیار مهم است.

در فرایند بستن پیچ علاوه بر تنش کششی، تنش برشی نیز در پیچ به منظور اعمال نیروی همبندی شکل می‌گیرد. بسیاری از مطالعات قبلی بر روی تغییرات سرعت موج اولتراسونیک به رفتار پیچ تنها در کشش خالص پرداخته‌اند که از اثر تنش پیچشی صرف‌نظر شده است. شکل ۴-۲۷ توزیع تغییر شکل پلاستیک در کشش خالص و در فرایند همبندی از مرجع [۳] را نشان داده است که توجه‌کننده کاهش سرعت موج اولتراسونیک در فرایند همبندی پیچ نسبت به کشش خالص به دلیل اعمال تنش برشی، تمرکز تنش بیشتر در رزوه‌های پیچ و تغییر شکل پلاستیک می‌باشد. باید خاطر نشان کرد اگرچه مقداری تغییر شکل پلاستیک در رزوه‌های پیچ پس از همبندی ایجاد می‌شود اما اکثر قسمت‌های پیچ و قطعات متصل شده در حالت الاستیک باقی می‌مانند.



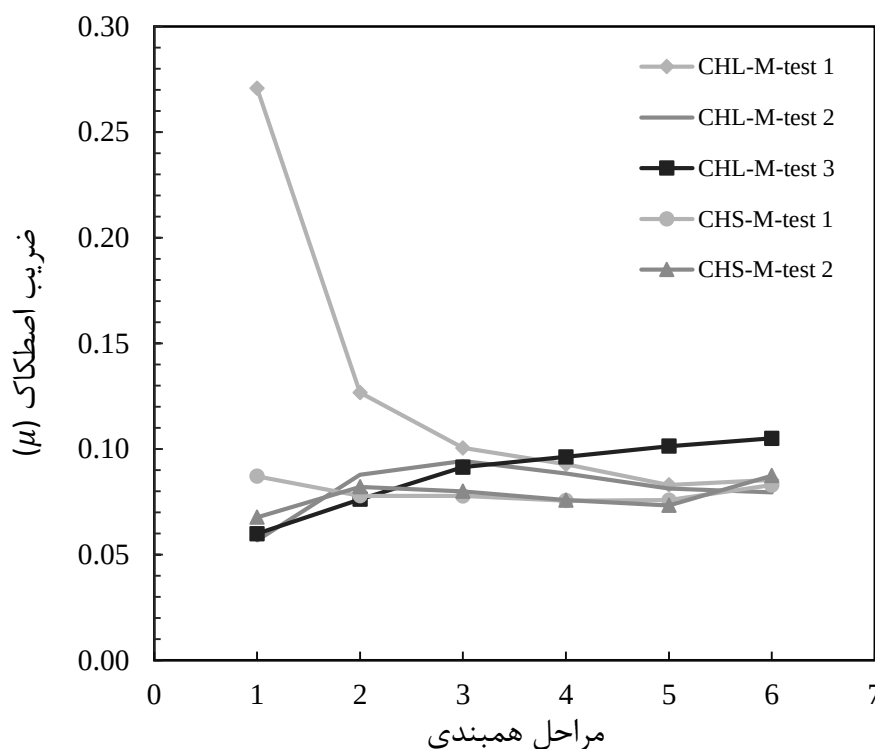
شکل ۴-۲۷ گسترش ناحیه پلاستیک پیچ M12 (a) در کشش خالص (b) در فرایند همبندی [۳]

عامل اثر گذار دیگر بر روی تنش، ضریب اصطکاک است که تعداد دفعات همبندی و پوشش پیچ بر روی این عامل اثر می‌گذارد. شکل ۴-۲۸ نشان می‌دهد که ضریب اصطکاک اثر بیشتری بر تنش و گسترش ناحیه پلاستیک دارد، زیرا برای ایجاد نیروی همبندی مشخص با افزایش اصطکاک نیاز به گشتاورهای بزرگتری می‌باشد.



شکل ۴-۲۸ اثر ضریب اصطکاک بر روی گسترش ناحیه پلاستیک پیچ M12 [۳]

در مرحله اول همبندی پیچ‌های بلند سرسیلندر و یاتاقان کپه، شکل رزوه‌های پیچ کاملاً منطبق با رزوه‌های سیلندر نمی‌باشد و از طرفی صافی سطح زیر گل پیچ در حالت مناسب است؛ بنابراین در همبندی پیچ نو بیشترین سهم گشتاور نسبت به سایر مراحل همبندی صرف تغییر شکل رزوه‌ها و سطوح زبر و خشن می‌شود. این پدیده به خصوص در پیچ بلند سرسیلندر به وضوح در تغییرات سرعت موج اولتراسونیک به دلیل افزایش تنش پیچشی در رزوه‌ها نسبت به سایر مراحل در شکل ۴-۲۴ قابل مشاهده است. با بررسی ضریب اصطکاک پیچ‌های بستار، اثر عدم تطابق شکل رزوه پیچ‌های بلند سرسیلندر نسبت به پیچ کوتاه قابل مشاهده است (شکل ۴-۲۹). بنابراین شرایط اصطکاکی به عنوان عامل تعیین کننده کاهش تنش پیچشی و افزایش دقت اندازه‌گیری اولتراسونیک است.



شکل ۴-۲۹ مقایسه ضرایب اصطکاک پیچ‌های کوتاه و بلند سرسیلندر در آزمون سوم

در مراحل بعدی رزوه‌ها شکل گرفته، گشتاور اعمالی صرف غلبه بر اصطکاک زیر گل پیچ می‌شود که باعث اعمال نیروی همبندی بیشتر با اعمال تنش پیچشی کمتر و گشتاور پایین‌تر می‌شود. این حالت شرایط مناسب‌تری برای مقایسه با تغییرات سرعت موج اولتراسونیک در کشش خالص است. با مقایسه نتایج می‌توان دریافت که تطابق خوبی با مرجع [۴۴] وجود دارد. در آزمون سوم فرایند همبندی با پیچ بدون پوشش انجام شد که رزوه‌ها به صورت کامل شکل گرفته، ضریب اصطکاک زیر گل پیچ با افزایش مراحل همبندی و در رزوه‌ها با حذف پوشش افزایش یافته است که باعث تغییرات سرعت موج اولتراسونیک می‌شود.

علاوه بر موارد بیان شده، با در نظر گرفتن طول پیچ‌ها، تغییر طول پلاستیک پیچ‌های کوتاه نسبت به پیچ‌های بلند شدیدتر است (جدول ۴-۱۷). همان‌طور که در آزمون تجربی پیچ کوتاه در شکل ۴-۲۵ نشان داده شده است، تغییرات سرعت موج اولتراسونیک در ناحیه پلاستیک غیرخطی بوده و پیش‌بینی

آن با حذف ثابت مرتبه سه معادله ۲۹ امکان پذیر نیست. مرجع [۱۲] تغییرات غیرخطی سرعت موج اولتراسونیک در ناحیه پلاستیک را تأیید می‌کند.

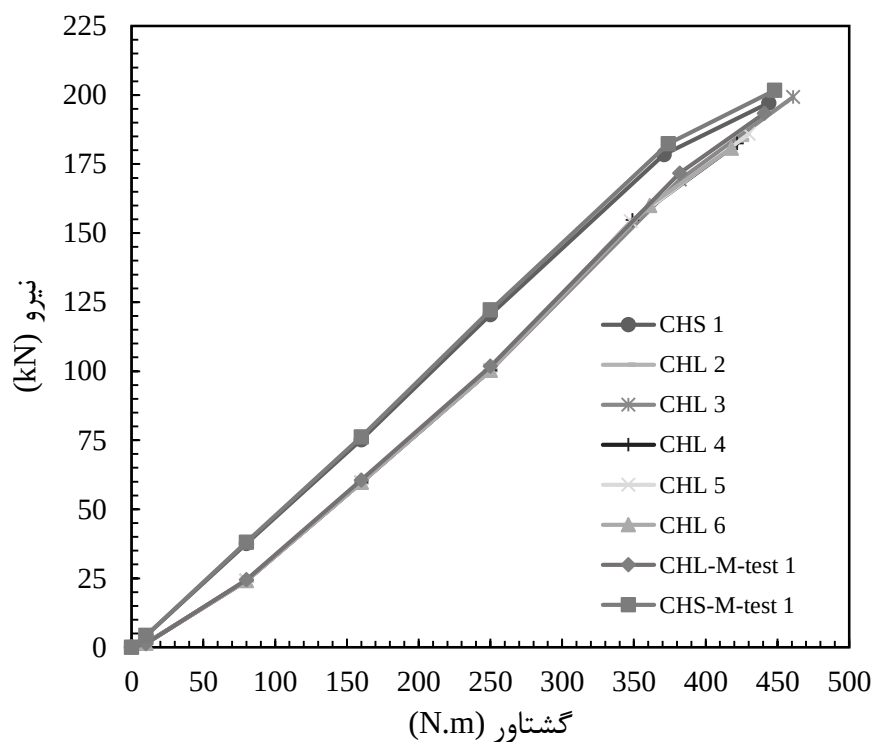
بنابراین برای محاسبه تنش کششی (MPa) و گشتاور (N.m) پیچ کلاس ۱۲/۹ با طول بستن با استفاده از زمان تأخیر موج اولتراسونیک (ns) یا تغییر طول اولتراسونیک (mm) می‌توان به‌صورت مستقیم از معادله‌های ۴۵ و ۴۶ استفاده نمود. مقادیر تنش محاسبه شده از معادله ۱۲ با مرجع [۱۷] برای پیچ M10×1.5 کلاس ۱۰,۹ مقایسه و مقادیر تفاوت کمتر از ۱/۸٪ و مقادیر تفاوت در برآورد تنش نسبت به واشر نیروسنج در محدوده ۹٪ مشاهده شد. بر این اساس می‌توان با پذیرفتن مقداری خطا، تخمینی از تنش در پیچ‌های استحکام بالا با سایر ابعاد را هم به دست آورد.

$$\sigma(MPa) = 2.11 \times 10^5 \left(\frac{L_{ult} - L_0}{c_0} \right) + 15.12 \quad 45$$

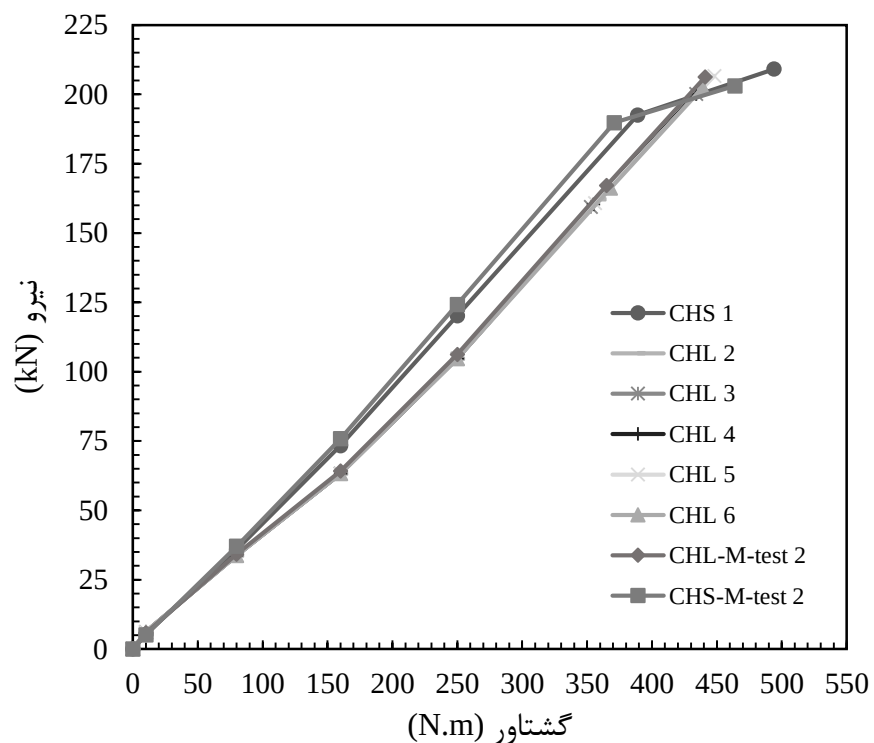
$$Torque (N.m) = 140.26 \times (L_{ult} - L_0) + 7.16 \quad 46$$

۴-۶- بررسی وضعیت عمر پیچ سرسیلندر در شرایط کارکرد واقعی

در بخش آزمون همبندی اول پیچ‌ها، گشتاورهای اندازه‌گیری شده در دو زاویه بستن در جدول ۴-۱۴ ارائه شد. مقادیر نیروهای همبندی اعمالی با استفاده از معادله ۲۴ و اعمال ضریب اصطکاک محاسبه شده برای هر مرحله بستن از آزمون همبندی سوم (شکل ۴-۱۹ و شکل ۴-۲۰) محاسبه و در شکل ۴-۳۰ و شکل ۴-۳۱ با نتایج آزمون اندازه‌گیری نیروی همبندی پیچ توسط واشر نیروسنج در شرایط مشابه مقایسه شد.



شکل ۴-۳۰ محاسبه نیروهای همبندی پیچ‌های کوتاه و بلند سرسیلندر در مرحله اول و مقایسه با نیروی‌های اندازه‌گیری شده با نیروسنج در آزمون سوم



شکل ۴-۳۱ محاسبه نیروهای همبندی پیچ‌های کوتاه و بلند سرسیلندر در مرحله دو و مقایسه با نیروی‌های اندازه‌گیری شده با نیروسنج در آزمون سوم

در شکل ۳۰-۴ و شکل ۳۱-۴ نیروهای محاسبه شده در مرحله اول و دوم آزمون همبندی اول با نیروهای آزمون تجربی مقایسه شد که تطابق خوبی میان آنها برقرار بود. در جدول ۴-۱۸ مقادیر تغییرات نیروها به مقدار متوسط نیروهای پیچ و همچنین نسبت به نیروی پیچ مرجع نشان داده شده است. نیروهای همبندی نهایی که با واشر نیروسنج اندازه‌گیری شده بود به ترتیب برای پیچ‌های بلند و کوتاه در مرحله اول $193/37 \text{ kN}$ و $201/7 \text{ kN}$ و در مرحله دوم $206/3 \text{ kN}$ و $203/1 \text{ kN}$ می‌باشد. مقادیر متوسط نیروهای همبندی محاسبه شده برای پیچ‌های بلند در مرحله اول $186/4 \text{ kN}$ و در مرحله دوم $202/2 \text{ kN}$ بود. انحراف استاندارد نیروی پیچ‌های بلند در مرحله اول $7/4 \text{ kN}$ و در مرحله دوم $2/7 \text{ kN}$ می‌باشد. مقدار متوسط نیروهای همبندی محاسبه شده برای پیچ‌های بلند و کوتاه در مرحله اول و دوم به ترتیب $188/2 \text{ kN}$ و $203/4 \text{ kN}$ است. مقدار انحراف استاندارد نیروهای همبندی پیچ‌های بلند و کوتاه محاسبه شده برای مرحله اول 8 kN و مرحله دوم $3/7 \text{ kN}$ می‌باشد.

مقدار متوسط نیروهای همبندی محاسبه شده در مرحله اول و دوم پیچ‌های بلند سرسیلندر با مقدار واقعی در مراحل متناظر مقایسه شد که قدرمطلق تغییرات به‌دست آمده به ترتیب $6/7 \text{ kN}$ و 4 kN است. همچنین مقدار قدرمطلق تغییرات متوسط نیروهای همبندی محاسبه شده تمام پیچ‌ها نسبت به متوسط نیروهای همبندی اندازه‌گیری شده برای مرحله اول $9/3 \text{ kN}$ و برای مرحله دوم $1/3 \text{ kN}$ می‌باشد. براین اساس می‌توان بیان نمود که انحراف استاندارد مقادیر تخمین زده شده نیروهای همبندی کم است و قابلیت استفاده کاربردی با دقت خوبی را دارد.

جدول ۴-۱۸ نیروهای همبندی محاسبه شده آزمون اول و تغییرات آنها

مرحله همبندی	شماره پیچ	نیروی همبندی (kN)	قدر مطلق تغییرات به مقدار متوسط (kN)	قدر مطلق تغییرات به مقدار متوسط پیچ‌های مرجع (kN)
مرحله اول	۱	۱۹۷/۱	۸/۹	۰/۴
	۲	۱۸۴/۷	۴/۵	۱۳/۸
	۳	۱۹۹/۳	۱۱/۱	۱/۸
	۴	۱۸۲/۴	۵/۸	۱۵/۱
	۵	۱۸۵/۹	۲/۳	۱۱/۶
	۶	۱۸۷/۱	۷/۵	۱۶/۸
مرحله دوم	۱	۲۰۹/۱	۶/۹	۴/۶
	۲	۲۰۱/۶	۰/۶	۳/۱
	۳	۲۰۰/۲	۲	۴/۵
	۴	۲۰۰/۲	۲	۴/۵
	۵	۲۰۶/۷	۴/۴	۲
	۶	۲۰۲/۵	۰/۳	۲/۲

۴-۶-۱ بررسی اثر حرارت و نیروی احتراق بر نیروی همبندی پیچ

به‌منظور بررسی رفتار حین کار پیچ‌های سرسیلندر، ویژگی‌های ابعادی پیچ‌های کوتاه و بلند و سایر داده‌های مورد نیاز برای محاسبات پیچ در جدول ۴-۱۹ آورده و تمامی پارامترهای ابعادی در شکل ۲-۹ و شکل ۲-۱۰ معرفی شده است. با توجه به آزمون آنالیز شیمیایی، پیچ‌های ساخته شده نسبت به پیچ اصلی فاقد عنصر نیکل می‌باشند. در آزمون ضربه در دمای ۲۰- درجه سانتی‌گراد اثر عنصر نیکل بر کاهش دمای تبدیل و عدم مقاومت به ضربه پیچ ساخته شده سرسیلندر مشاهده شد. تفاوت مقاومت به ضربه در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد نیز نتایج مشابهی را نشان داد. این در حالی می‌باشد که پیچ‌های سرسیلندر مطابق استاندارد در محدوده کلاس ۱۲/۹ هستند. این تفاوت در پیچ‌های یاتاقان کپه بسیار

کمتر است. بنابراین بررسی اثر مقاومت به خستگی (عمر بی‌نهایت ۱ میلیون سیکل) پیچ‌های سرسیلندر در نیروهای حین کارکرد واقعی حائز اهمیت است.

جدول ۴-۱۹ مشخصات پیچ‌های کوتاه و بلند سرسیلندر

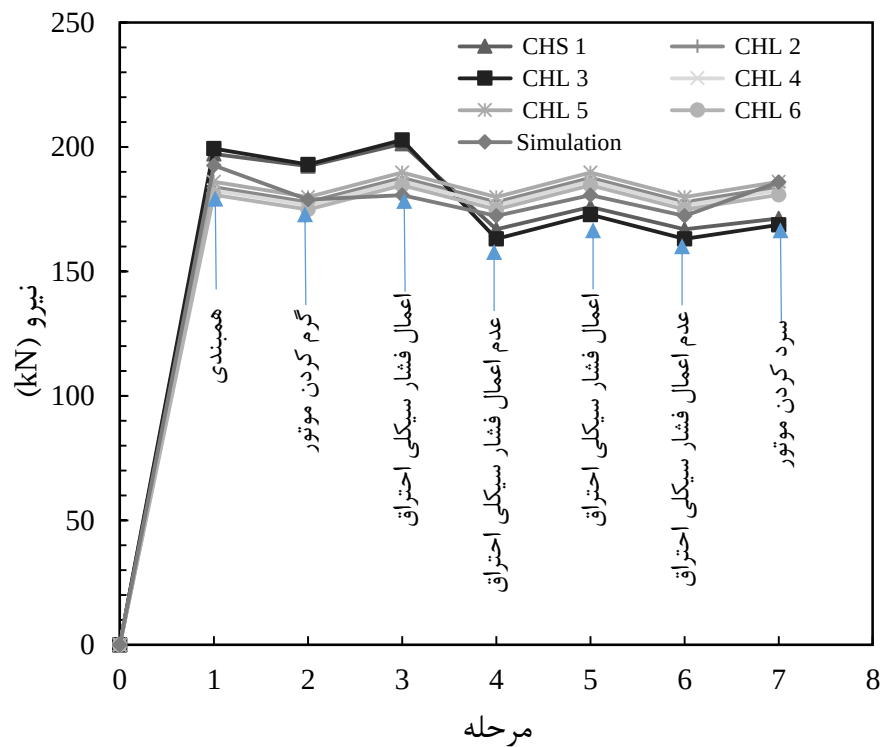
ردیف	پارامترها	پیچ بلند سرسیلندر (CHL)	پیچ کوتاه سرسیلندر (CHS)
۱	مدول یانگ در دمای محیط (GPa)	۲۱۰	۲۱۰
۲	مدول یانگ در دمای ۹۰ درجه سانتی‌گراد (GPa) [۴۵]	۲۰۵	۲۰۵
۳	قطر نامی (mm)	۱۶	۱۶
۴	قطر ساق پیچ (mm)	۱۴/۹	۱۴/۹
۵	قطر داخلی پیچ (mm)	۱۴/۱۶	۱۴/۱۶
۶	طول ساق پیچ (mm)	۱۰۵/۲۵	۵۱
۷	طول رزوه‌های آزاد (mm)	۲۴/۷۵	۲۰
۸	طول اتصال (mm)	۱۳۰	۷۱
۹	قطر زیر گل پیچ (mm)	۲۸/۵	۲۸/۵
۱۰	قطر خارجی اتصال (mm)	۳۵	۳۵

فشار حداکثر ناشی از احتراق سوخت در حالت بسته بودن میل سوپاپ‌ها موتور دیزل ۱۲۰ bar و قطر سیلندر ۱۳۰ mm می‌باشد که به معنی اعمال نیرویی معادل ۱۵۶ kN به مجموع تمام پیچ‌ها است. چهار پیچ بلند ۲، ۳، ۵ و ۶ که در شکل ۲-۳ نشان داده شده است، در ناحیه فصل مشترک دو سرسیلندر قرار می‌گیرند که ۵۰٪ نیروی اعمالی به آن انتقال داده می‌شود. پیچ‌های ۱ و ۴ برای هر سرسیلندر استفاده می‌شوند. در نتیجه سهم نیروی خارجی برای هر پیچ از این نیرو ۳۹ kN می‌باشد. مقادیر سفتی عضوهای اتصال سرسیلندر در جدول ۴-۲۰ ارائه شده است. برای محاسبه سفتی پیچ‌ها از معادله‌های ۴ تا ۹ و برای محاسبه سفتی سرسیلندر از معادله‌های ۱۰ و ۱۱ استفاده شد. از معادله ۱۴ برای محاسبه سفتی اتصال پیچ کوتاه و بلند با در نظر گرفتن سفتی واشر سرسیلندر مورد استفاده قرار گرفت.

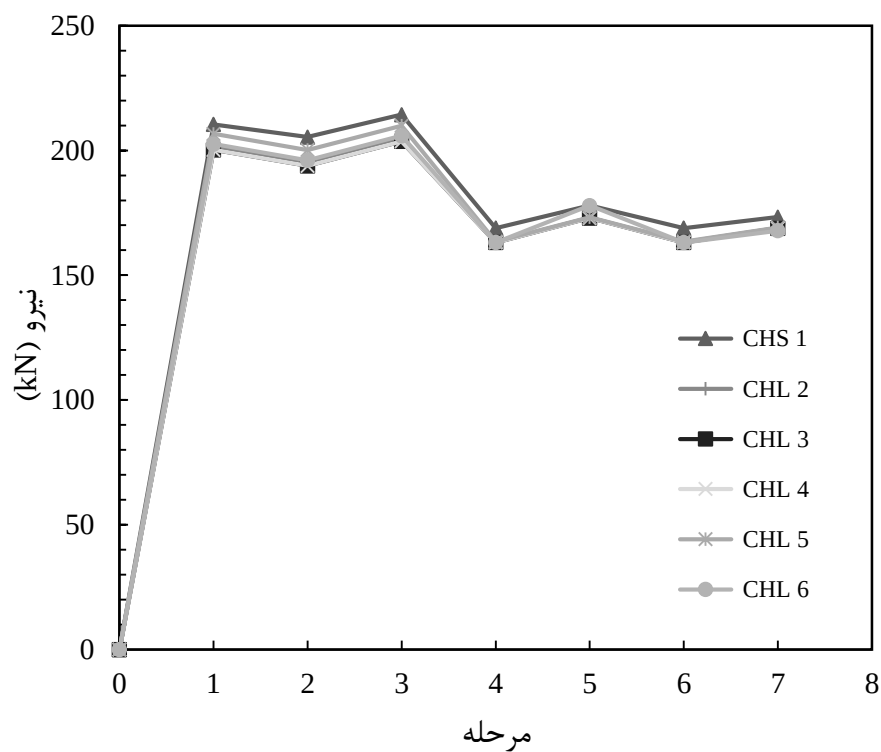
جدول ۴-۲۰ سفتی‌های محاسبه شده برای پیچ‌ها، واشر سرسیلندر و عضوهای اتصال

ردیف	عضو	سفتی (10^9 N/m)
۱	سرسیلندر در ناحیه اتصال پیچ کوتاه	۱۲/۹۶۷
۲	سرسیلندر در ناحیه اتصال پیچ بلند	۷,۲۰۴۵
۳	پیچ کوتاه	۰/۳۸۰۱
۴	پیچ بلند	۰/۲۳۱
۵	واشر سرسیلندر [۴۶]	۵۰

در این مرحله به بررسی اثر نیروهای ناشی از احتراق داخلی و حرارت در شرایط کارکرد موتور پرداخته می‌شود. در فرایند کارکرد در مرحله اول نیروهای همبندی سرد محاسبه خواهد شد. سپس اثر حرارت بر روی نیروی همبندی بررسی می‌شود. سپس تغییر نیروهای همبندی بر اثر اعمال بار خارجی بر روی پیچ از معادلات ۱۲ و ۱۳ محاسبه مرود مطالعه قرار می‌گیرد. به‌منظور بررسی رفتار الاستوپلاستیک پیچ‌ها تحت اثر نیروهای احتراق داخلی نیاز به آزمون کشش پیچ و تعیین حد تسلیم و شکست پیچ می‌باشد که در جدول ۴-۳ نشان داده شده است. در این قسمت احتمال ورود پیچ به محدوده پلاستیک وجود خواهد داشت. این به معنی ایجاد کرنش پلاستیک و تغییر طول اولیه در پیچ می‌باشد. مقدار کرنش پلاستیک ϵ_p از تنش پلاستیک σ_p محاسبه و در نهایت مقدار افزایش طول ΔL از ضرب کرنش پلاستیک در طول ناحیه درگیر محاسبه می‌شود. این مقدار افزایش طول پیچ سبب کاهش نیروی همبندی پس از حذف بار خارجی خواهد شد. برای بررسی بیشتر به‌منظور ورود یا عدم ورود پیچ در ناحیه پلاستیک در اثر اعمال بار ناشی از احتراق داخلی پس از کاهش نیروی همبندی، اعمال بار به صورت باید انجام شود. در نهایت مقدار نیروی همبندی پس از خاموش و سرد شدن موتور گزارش خواهد شد. محاسبات بیان شده برای دو سری مونتاژ با نیروهای همبندی محاسبه شده انجام گردید (شکل ۴-۳۲ و شکل ۴-۳۳).



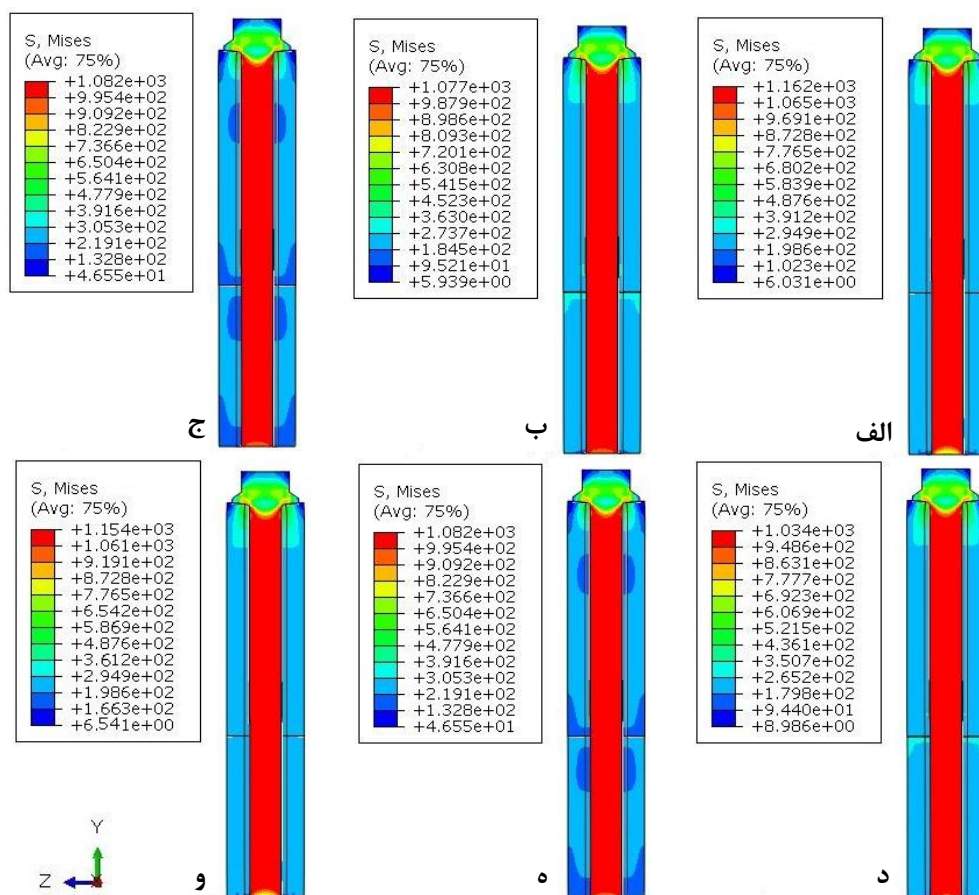
شکل ۴-۳ محاسبه اثر نیروهای خارجی و حرارت بر پیچ‌های کوتاه و بلند سرسیلندر در همبندی اول



شکل ۴-۳ محاسبه اثر نیروهای خارجی و حرارت بر پیچ‌های کوتاه و بلند سرسیلندر در همبندی دوم

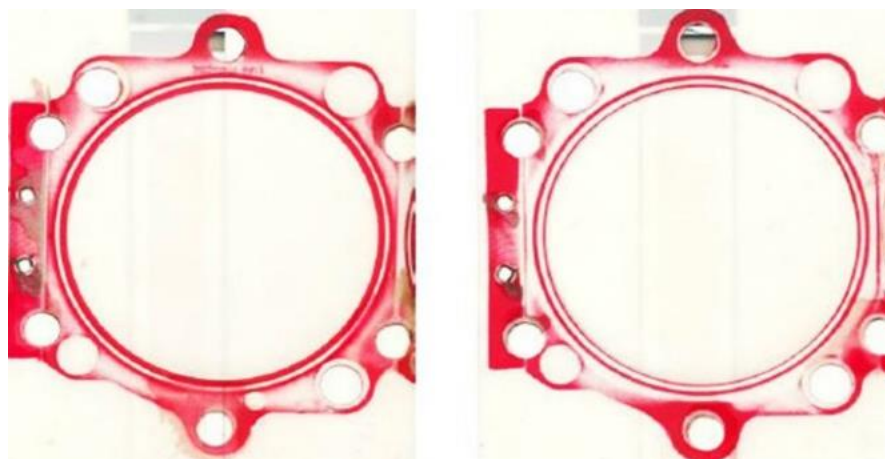
همان‌طور که در شکل‌ها نشان داده شده است در مرحله اول نیروی همبندی محاسبه شده به پیچ‌ها اعمال شد که از جدول ۴-۱۸ می‌توان دریافت که نیروی همبندی تقریباً تا ناحیه تسلیم یا در محدوده زیر حد تسلیم قرار دارند. در مرحله دوم موتور تا قبل از بارگذاری گرم می‌شود. اثر افزایش دما تا ۹۰ درجه سانتی‌گراد بر روی کاهش نیروی همبندی پیچ‌ها به دلیل تفاوت ضریب انبساط حرارتی پیچ و سرسیلندر محاسبه شد. در مرحله سوم با اعمال نیروی خارجی و در نظر گرفتن نیروهای همبندی در مرحله دوم، تعدادی از پیچ‌ها وارد ناحیه پلاستیک شده که با افزایش طول اولیه پیچ سبب کاهش نیروی همبندی می‌شود. مقدار حداکثر تنش محاسبه شده از تنش حد شکست پیچ‌ها کمتر است. در مرحله چهارم کاهش نیروی همبندی ناشی از ازدیاد طول محاسبه شده است. در مرحله پنجم به‌منظور اطمینان از عدم ورود مجدد پیچ به ناحیه پلاستیک بارگذاری مجدد اعمال و نیروی پیچ محاسبه شد که عدم ورود به ناحیه پلاستیک را تأیید کرد. در مرحله ششم از ذکر ثابت بودن مجدد نیروی همبندی با در نظر گرفتن عدم ورود پیچ به ناحیه پلاستیک صرف‌نظر شد. در نهایت نیروی همبندی پیچ در دمای محیط پس از خاموش شدن موتور در مرحله هفتم محاسبه شد که نشان دهنده این بود که نیروی همبندی پس از سرد شدن موتور برای پیچ‌های که وارد ناحیه پلاستیک نشده‌اند برابر نیروی همبندی محاسبه شده اولیه می‌باشد. در صورت عدم سفت کردن مجدد پیچ‌ها و یا همبندی مجدد، چرخه نیرویی برای پیچ‌هایی که تغییر شکل پلاستیک داده‌اند از مرحله چهارم پس از هر بار روشن و خاموش کردن موتور تکرار می‌شود. شکل ۴-۳۴ نتیجه حاصل از شبیه‌سازی اتصال پیچ که با هدف به‌دست آوردن میزان توزیع تنش ون-میسز ایجاد شده در عضوهای اتصال انجام شده است را نشان می‌دهد. بر طبق این تحلیل مقدار تنش بیشینه در پیچ برابر با 1162 MPa است. با توجه به تنش تسلیم پیچ $M16 \times 1.5$ کلاس ۱۲/۹ که برابر با 1211 MPa است، می‌توان از سلامت اتصال در بارگذاری اولیه مطمئن بود (شکل ۴-۳۴ الف)). پس از گرم شدن پیچ در حالت بدون اعمال بار خارجی مقدار نیروی همبندی تا 1077 MPa کاهش یافت (شکل ۴-۳۴ ب)). پس از بارگذاری مقدار افزایش نیروی محوری پیچ و کاهش نیروی همبندی مشاهده شد (شکل ۴-۳۴ ج)). با بررسی قسمت (ج) تا (ه) که فرایند بارگذاری،

باربرداری و بارگذاری مجدد را نشان داد، تکرار محدوده نیروهای خستگی مشخص شد. در نهایت مقدار نیروی همبندی پس از سر شدن و عدم اعمال بار خارجی در (شکل ۴-۳۴ و) نشان داده شده است.



شکل ۴-۳۴ توزیع تنش مؤثر ون-میسز در اجزای اتصال بر حسب مگاپاسکال

در شکل ۴-۳۵ آزمون کاغذ فوجی با توجه به نیروهای همبندی پیچ که معادل حدوداً ۷۵۸ kN می باشد، نشان داده شده است که به بررسی توزیع نیروهای اعمالی و مقایسه با یکنواختی نیروهای محاسبه شده در همبندی سرد پرداخته شد. براساس کاغذ فوجی مقدار توزیع نیروی اعمالی پیچ ها تقریباً یکسان بوده و می توان آن را تائیدی برای محاسبات تحلیلی دانست. نتایج محاسبه نیروهای همبندی باقی مانده در پیچ ها نشان دهنده حفظ شرایط آب بندی سرسیلندر در نیروهای احتراقی می باشد.



شکل ۴-۳۵ آزمون توزیع نیروی اعمالی پیچ‌ها با کاغذ فوجی

بر اساس گشتاورها و نیروهای همبندی از آزمون‌های تجربی و ضرایب اصطکاک محاسبه شده تنها ۱۰٪ تا ۱۵٪ از گشتاور اعمالی صرف ایجاد نیروی همبندی در پیچ‌ها می‌شود. بر اساس ضرایب اصطکاک محاسبه شده از گشتاورها می‌توان نیروهای همبندی را با دقت خوبی محاسبه نمود. محدوده نیروهای همبندی محاسبه شده نشان دهنده دقت مناسب استفاده از روش اعمال زاویه برای بستن پیچ‌ها تا ناحیه تسلیم می‌باشد. بر اساس محاسبات عددی در همبندی اول، نیروی همبندی به دلیل صرف گشتاور برای شکل‌دهی رزوه‌ها از نیروهای همبندی مرحله دوم کمتر است. افزایش نیروی همبندی مرحله دوم سبب می‌شود تمامی پیچ‌ها در این مرحله در اثر اعمال بار خارجی وارد ناحیه پلاستیک شوند. براساس نتایج عددی نیروی پیچ‌ها در همبندی اول و دوم پس از اعمال بار خارجی و گرم شدن همگرا می‌شوند. بیشترین مقدار تغییرات نیروی پیچ‌ها در همبندی اول بین ۹/۸ kN و مقدار متوسط آن ۹/۷ kN است. مقدار تغییرات نیرویی شبیه‌سازی در نیروی همبندی ۱۹۴ kN برابر ۸ kN برآورد شد. در همبندی مرحله دوم بیشترین تغییرات نیرویی محاسبه شده مشابه مرحله اول می‌باشد. در همبندی دوم پس از تغییر شکل پلاستیک نیروی همبندی نسبت به همبندی مرحله اول کاهش می‌یابد، در نتیجه مقاومت به عمر خستگی پیچ‌ها در همبندی دوم بیشتر است. نتایج مرجع [۹] بیان می‌کند که برآورد اثر نیروهای خارجی به صورت شبیه‌سازی ساده المان محدود نسبت به روابط محاسباتی بسیار نزدیکتر به حالت واقعی می‌باشد؛ بنابراین مقادیر نیروهای شبیه‌سازی به‌منظور انجام آزمون خستگی

برای عمر بی‌نهایت انتخاب شد. آزمون عمر خستگی پیچ بلند سرسیلندر ساخته شده با نیروهای شبیه‌سازی و فرکانس نیرویی ۴ Hz انجام شد. نتایج برای عمر بی‌نهایت (۱ میلیون سیکل) موفقیت آمیز بود.

۴-۷- آزمون بررسی تکنولوژی ساخت بر عمر خستگی در پیچ کپه یاتاقان ثابت

در این بخش به بررسی استحکام خستگی پیچ یاتاقان موتور دیزل برای تشخیص و تأثیر فرایندهای ساخت پیچ $M18 \times 1.5$ پرداخته شد. پیچ یاتاقان کپه موتور یک اتصال بحرانی می‌باشد؛ بنابراین مقایسه استحکام خستگی با پیچ‌های اصلی در این اتصال مهم است. بر اساس نتایج مراجع [۱۸-۲۰] عمر رزوه پیچ‌های نورد شده پس از عملیات حرارتی در نیروهای همبندی پایین می‌تواند بیشتر از پیچ‌های نورد شده قبل از عملیات حرارتی می‌باشد. در نیروهای همبندی بالا تنها عمر خستگی در پیچ‌های دندان‌ریز نورد شده پس از عملیات حرارتی افزایش می‌یابد و ترتیب فرایند ساخت در عمر پیچ‌های دندان‌درشت تغییری ایجاد نمی‌کند. بررسی‌های انجام شده به‌صورت خاص بر روی رزوه پیچ‌ها انجام شده و از بررسی هم‌زمان فرایند ساخت گل پیچ صرف‌نظر شده است. انواع روش‌های ترکیبی با ترتیب‌های مختلف را می‌توان برای ایجاد رزوه و گل پیچ استفاده کرد که هرکدام نتایج خواص خستگی مختلفی خواهند داشت. پیچ یاتاقان کپه یک اتصال بحرانی می‌باشد که در صورت شکست خستگی خسارت‌های جبران‌ناپذیری را به‌وجود می‌آورد. در این نوع از اتصالات توانایی تشخیص ترتیب و فرایندی که پیچ در آن تولید می‌شود، اهمیت خواهد داشت. به‌منظور بهبود خواص خستگی در پیچ‌های مورد استفاده در صنعت، این پیچ‌ها با فورج سرد، عملیات حرارتی و نورد سرد تولید می‌شوند. طبیعتاً، تولیدکنندگان تمایل به تولید رزوه‌ها (توسط فرآیند نورد یا ماشین‌کاری) قبل از عملیات حرارتی دارند که دلیل آن کاهش سایش ابزار/غلطک، آسان کردن فرآیند و افزایش نرخ تولید است. از طرفی فرایند فورج گرم نیز باعث کاهش نیروهای شکل‌دهی و افزایش قابلیت چکش‌خواری فلزات خواهد شد؛ بنابراین به‌منظور اطمینان از کیفیت و خواص آنالیز شکست، توانایی تشخیص فرایند تولیدی پیچ و اثرات آنها اهمیت

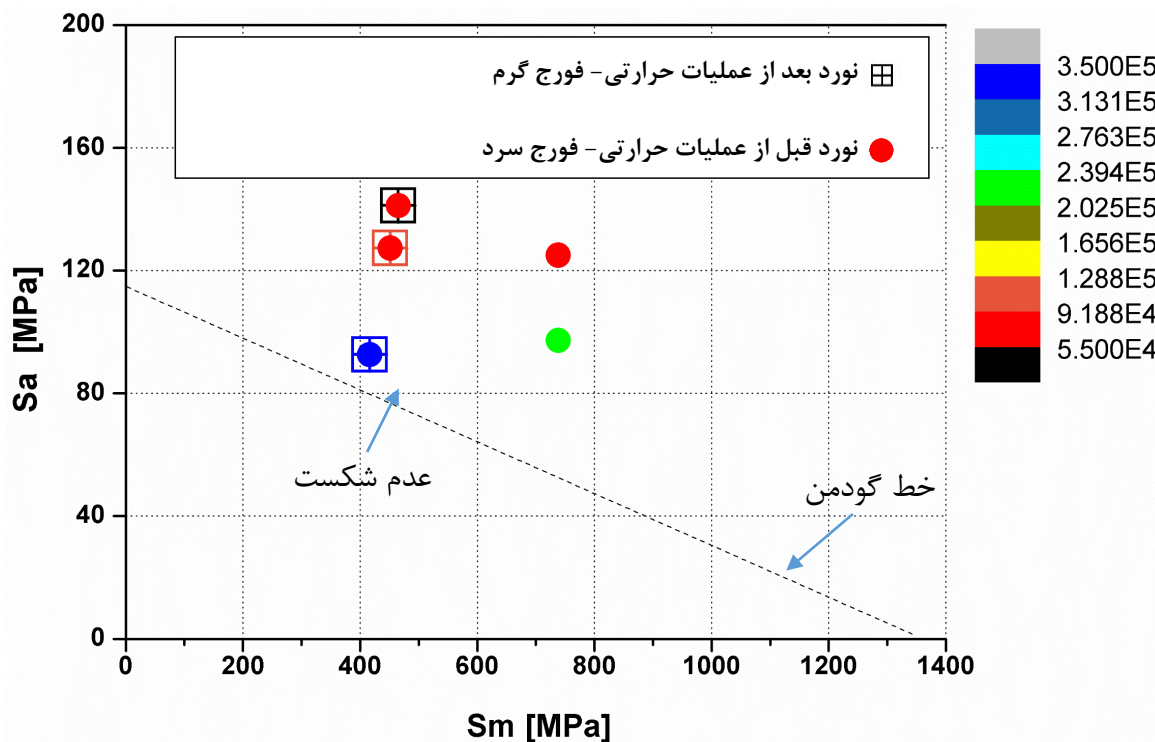
دارد. به همین دلیل به بررسی اثر ترتیب و نوع فرآیندهای ساخت بر روی خواص مکانیکی پیچ کلاس ۱۲/۹ و توسعه روش‌های آزمایشگاهی تمیز دادن بین آنها پرداخته شد. روش تولید پیچ‌های مورد مطالعه به صورت فورج سرد و گرم و نورد سرد با عملیات حرارتی قبل یا بعد نورد می‌باشد. بر اساس نتایج مراجع [۲۵] خواص خستگی با استفاده از آزمون کشش، سختی سنجی و تحلیل سطح مقطع شکست (با عکس SEM) قابل بررسی نیست. در آزمون‌های خستگی، متالوگرافی و میکروسختی می‌توان اثر فرآیند ساخت را به روشنی تمیز داد؛ بنابراین به منظور مقایسه پیچ‌های اصلی و ساخته شده طراحی آزمون خستگی در نیروهای همبندی مختلف مطابق جدول ۴-۲۱ انجام شده و نیروهای بارگذاری، نحوه کنترل بارگذاری، عمر و موقعیت شکست پیچ‌ها نیز گزارش شد. تغییرات فرکانس بارگذاری به دلیل محدودیت سخت‌افزاری دستگاه کشش در نیروهای بالا بود.

جدول ۴-۲۱ عمر خستگی پیچ‌های یاتاقان کپه

شماره	Fa (kN)	Fm (kN)	Smin (MPa)	Smax (MPa)	فرکانس (Hz)	سیکل	موقعیت شکست
۱	۳۰/۵	۱۰۰/۵	۱۴۱/۲	۴۶۵/۳	۵	۵۲۰۰۰	گل پیچ
۲	۲۷/۵	۹۷/۵	۱۲۷/۳	۴۵۱/۴	۵	۹۹۰۰۰	گل پیچ
۳	۲۰	۹۰	۹۲/۶	۴۱۶/۷	۵	۳۴۰۰۰۰	عدم شکست
۱	۲۷/۵	۹۷/۵	۱۲۷/۳	۴۵۱/۴	۵	۷۲۰۰۰	رزوه
۲	۳۰/۵	۱۰۰/۵	۱۴۱/۲	۴۶۵/۳	۵	۷۵۰۰۰	رزوه
۳	۲۷/۵	۹۷/۵	۱۲۷/۳	۴۵۱/۴	۵	۵۵۰۰۰	رزوه
۴	۲۱	۱۵۹/۵	۹۷/۲	۷۳۸/۴	۳	۲۰۷۰۰۰	گل پیچ
۵	۲۷	۱۵۹/۵	۱۲۵	۷۳۸/۴	۳	۵۸۰۰۰	گل پیچ
۶	۲۰	۹۰	۹۲/۶	۴۱۶/۷	۵	۳۵۰۰۰۰	عدم شکست

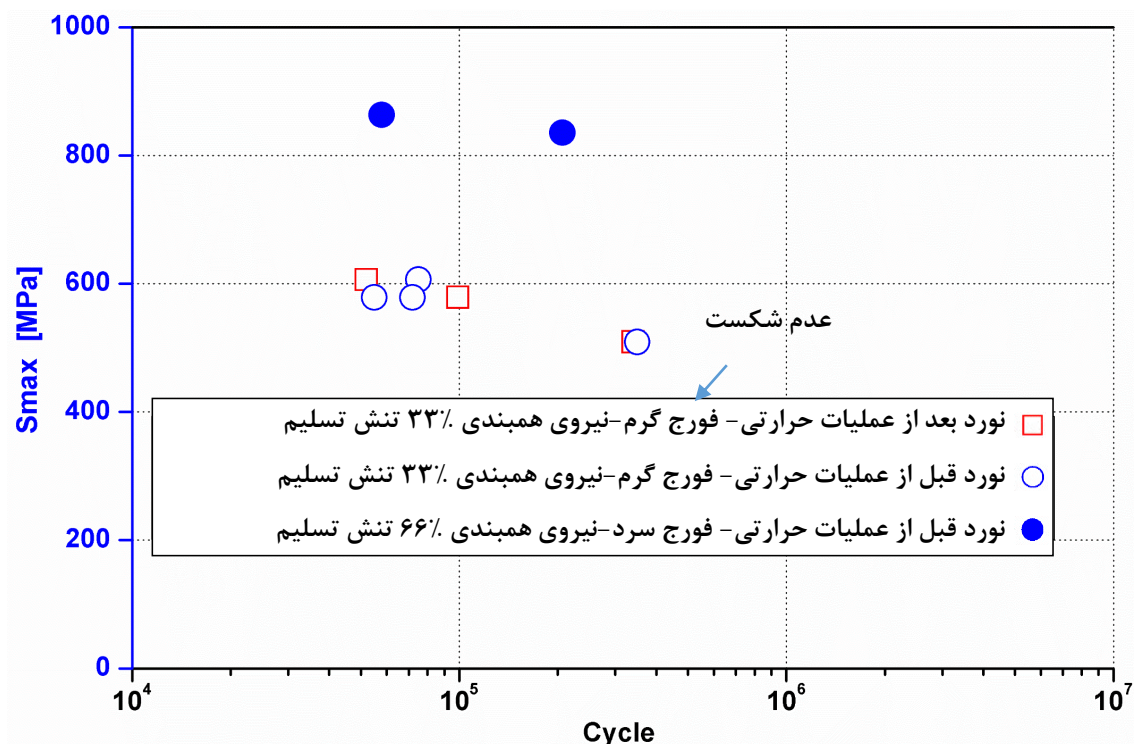
شکل ۴-۳۶ نتایج آزمون خستگی پیچ‌های اصلی و ساخته شده را نسبت به تئوری گودمن (با توجه به منحنی حد دوام خستگی) را نشان می‌دهد. براساس نتایج به دست آمده پیچ‌های ساخته شده در مقایسه

با پیچ‌های اصلی دارای عمر خستگی یکسانی هستند. به‌گونه‌ای که پیچ‌های ساخته شده در نیروهای همبندی کم و بارهای نوسانی زیاد، از ناحیه رزوه دچار خرابی می‌شوند، ولی پیچ‌های اصلی از ناحیه گل پیچ دچار شکست می‌شوند.



شکل ۴-۳۶ نمودار خستگی با معیار گودمن

نتایج آزمون‌های خستگی بر اساس فرایند ساخت رزوه قبل و بعد از عملیات حرارت، فورج گرم و سرد گل پیچ و نیروهای همبندی به‌صورت ۶۶٪ و ۳۳٪ از تنش تسلیم در شکل ۴-۳۷ نشان داده شده است. تنش تسلیم بر اساس آزمون تجربی ۲۱۰ kN می‌باشد. پیچ‌های ساخته شده به روش نورد قبل از عملیات حرارتی و فورج سرد و پیچ‌های اصلی به روش نورد سرد بعد از عملیات حرارتی و فورج گرم ساخته شده‌اند.

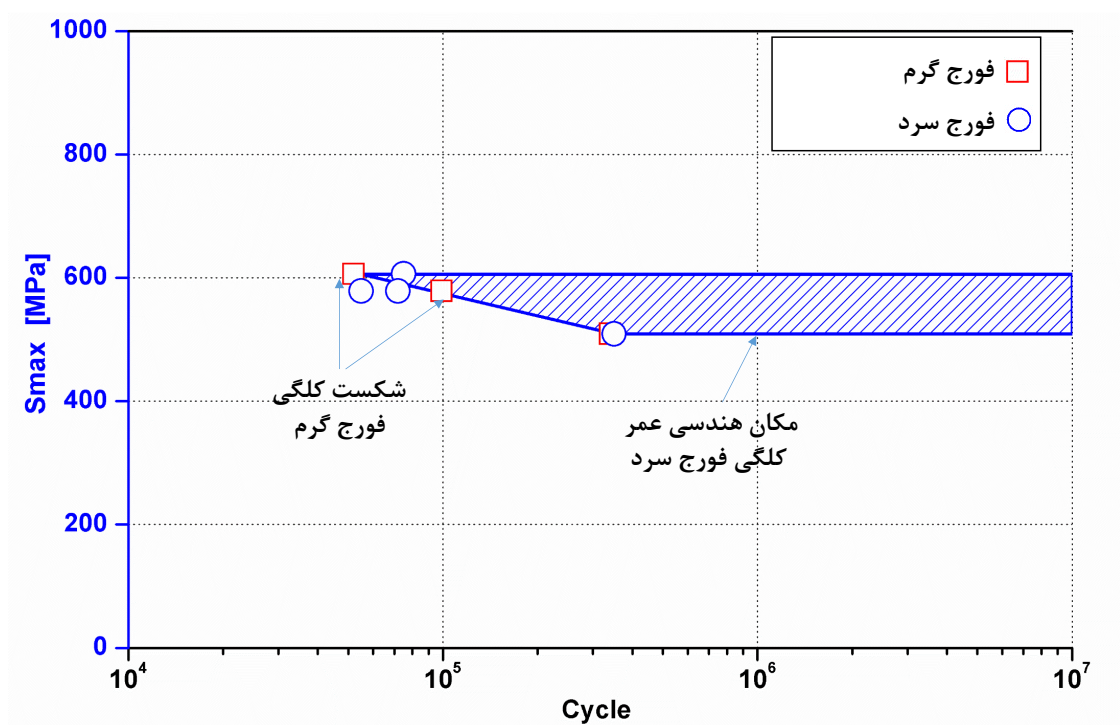


شکل ۴-۳۷ نمودار تغییرات عمر خستگی پیچ‌های تولید شده با روش‌های مختلف در نیروهای همبندی متفاوت

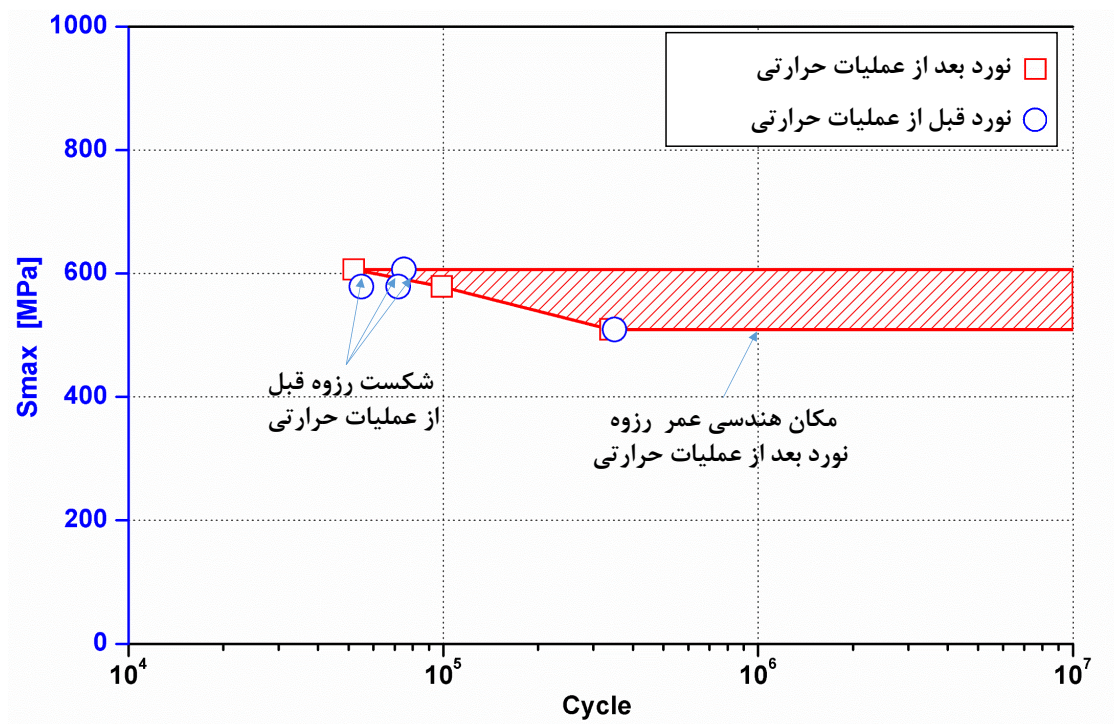
براساس نتایج به دست آمده در شکل ۴-۳۸، پیچ‌هایی که گل پیچ آنها به روش فورج گرم ساخته شده از گل پیچ شکسته است؛ اما پیچ‌هایی که به روش فورج سرد ساخته شده‌اند دارای عمر بیشتری در محدوده باند تعیین شده می‌باشند. دلیل این موضوع می‌تواند این باشد که در فورج گرم، پس از خنک‌کاری کَلگی، تنش‌های پس‌ماند کششی در پوسته خارجی به‌وجود می‌آید که می‌تواند در رشد ترک‌ها تأثیرگذار باشد. لازم به ذکر است که فرایند فورج سرد به‌مراتب برای پیچ‌های با ابعاد بزرگ هزینه‌برتر و پیچیده‌تر است. گل پیچ‌هایی که به روش فورج سرد ساخته شده‌اند عملکرد بهتری نسبت به فورج گرم دارند. در بررسی اثر فرایند ساخت رزوه در شکل ۴-۳۹ پیچ‌هایی که رزوه آن‌ها قبل از عملیات حرارتی نورد شده بودند، شکستند. این در حالی است که پیچ‌هایی که قبل از نورد رزوه، فرایند عملیات حرارتی بر روی آن انجام شده است، دارای محدوده عمر باند مشخص شده خواهند بود که نشان دهنده عملکرد بهتر آنها می‌باشد. در نیروهای همبندی کم و بارهای نوسانی بالا فرایند ساخت رزوه اهمیت قابل توجهی می‌یابد. فرایند کله‌زنی و نورد سرد سبب جریان پلاستیک به اطراف گل پیچ و ناحیه ریشه رزوه می‌شود.

از آنجا که این جریان یک تغییر شکل حجمی می‌باشد، تنش پس‌ماند در ریشه رزوه و گل پیچ گسترش می‌یابد. بعلاوه؛ نورد سرد شعاع بیشتری در ریشه پیچ ایجاد می‌کند که سبب کاهش تمرکز تنش می‌شود [۲۵]. در نهایت مقاومت به شکست رزوه پیچ‌ها با الگوی جریان دانه ایجاد شده توسط فرآیند نورد سرد بعد از عملیات حرارتی افزایش می‌یابد.

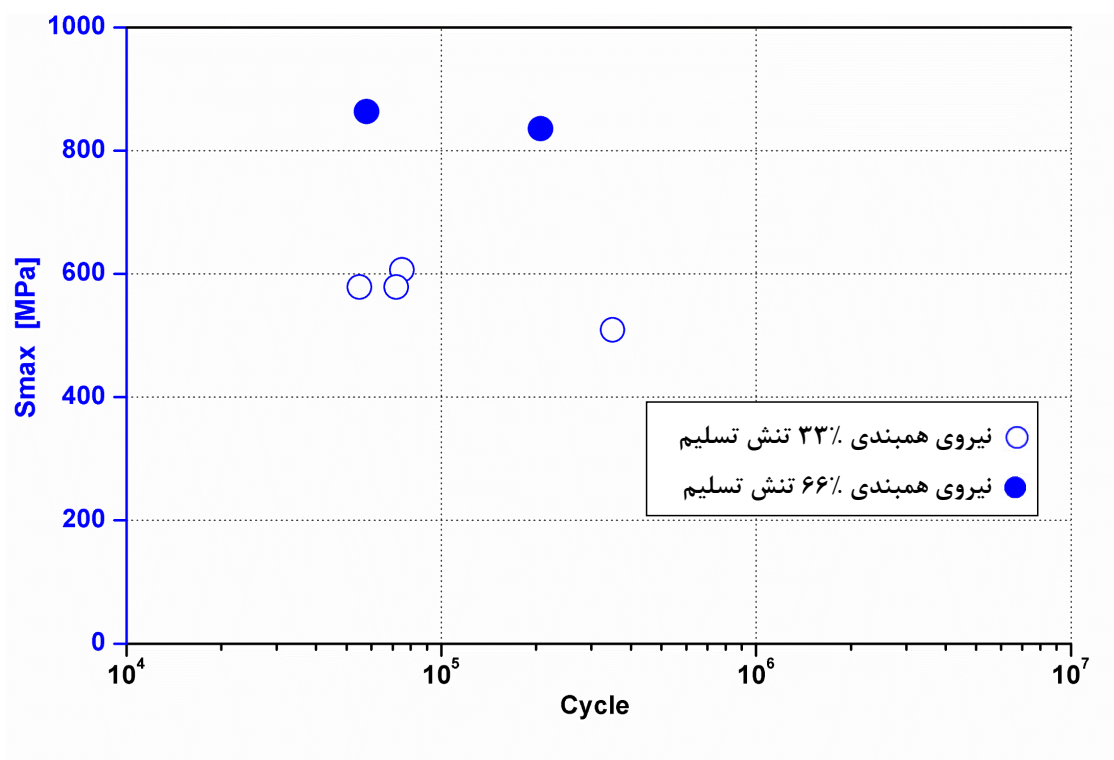
فرایند ساخت رزوه‌ها در بررسی عمر خستگی در شکل ۴-۴۰ نشان داد که عملیات ساخت رزوه‌ها در نیروهای همبندی کم و نیروهای نوسانی بالا، اهمیت دارد و در نیروهای همبندی زیاد و نیروهای نوسانی کم به دلیل شکست گل پیچ فرایند استحکام‌دهی به روش نورد سرد بعد از عملیات حرارتی اهمیت نمی‌یابد. عمر خستگی در نیروهای همبندی بالا وابسته به فرایند ساخت گل پیچ است.



شکل ۴-۳۸ نمودار مقایسه عمر خستگی پیچ‌های تولید شده با روش‌های ساخت مختلف گل پیچ در نیروهای همبندی کم و بار نوسانی زیاد



شکل ۴-۳۹ نمودار مقایسه عمر خستگی پیچ‌های تولید شده با روش‌های مختلف ساخت رزوه در نیروهای همبندی کم و بارهای نوسانی زیاد



شکل ۴-۴۰ بررسی مکانیزم شکست پیچ‌های ساخته شده در نیروهای همبندی مختلف

در شکل ۴-۴۱ شکل ۴-۴۲ سطوح شکست خستگی پیچ‌های ساخته شده و اصلی به ترتیب شماره‌گذاری پیچ‌های جدول ۴-۲۱ نشان داده شده است. هندسه شکست قسمت زیر گل مطابق با توزیع تنش شبیه‌سازی می‌باشد. بر اساس نتایج به‌دست آمده، پیچ‌هایی که فورج سرد شده بودند، عموماً شکست در رزوه‌ها از یک ترک در آخرین رزوه درگیر شروع می‌شود و پس از طی مرحله اول رشد ترک و ساخت سطوح ساحلی، دچار شکست ناگهانی می‌شوند. براساس سطوح شکست در شکل ۴-۴۱ و شکل ۴-۴۲ حدود $\frac{2}{3}$ ترک به‌صورت تدریجی طی می‌شود و در باقی مانده دچار شکست ترد و با زاویه نسبت به سطح مقطع اتفاق می‌شود. الگوی شکست تمام پیچ‌هایی که از رزوه شکستند، یکسان است. پیچ‌هایی که از گل شکستند، شروع ترک در انتهای محل تماس گل پیچ با ساق پیچ می‌باشد. ترک‌ها در مسیر بیشترین تنش اعمالی تا نصف قطر ساق پیچ نفوذ کرده و سپس شکست ناگهانی اتفاق می‌افتد.



نیروی همبندی ۳۳٪ تنش تسلیم

نیروی همبندی ۳۳٪ تنش تسلیم

نیروی همبندی ۳۳٪ تنش تسلیم



نیروی همبندی ۶۶٪ تنش تسلیم



نیروی همبندی ۶۶٪ تنش تسلیم

شکل ۴-۴۱ شکست خستگی پیچ‌های ساخته شده M18×1.5



نیروی همبندی ۳۳٪ تنش تسلیم

نیروی همبندی ۳۳٪ تنش تسلیم

شکل ۴-۴ شکست خستگی پیچ‌های اصلی M18×1.5

فصل ۵ نتیجه‌گیری و ارائه‌ی پیشنهادها

۵-۱- مقدمه

این پژوهش به بررسی تجربی، تحلیلی و عددی پارامترهای ساخت بر عملکرد پیچ‌ها در موتور دیزل دریایی می‌پردازد. جهت بررسی پارامترهای ساخت دو نوع پیچ با سه تغییر در فرایند ساخت مورد ارزیابی قرار گرفت. پیچ‌های سرسیلندر موتور دیزل از نظر جنس، روش ساخت رزوه و روش ساخت کلگی متفاوت بودند. در حالی که پیچ‌های یاتاقان ثابت از نظر روش رزوه و ساخت کلگی تفاوت داشتند. در نتیجه در بخش تجربی چهار ۴ دسته آزمون انجام گرفت. در بخش اول مربوط به تعیین و تأیید کلاس پیچ‌ها بود که براساس استاندارد DIN EN ISO 898 گرفته است. در بخش دوم ابتدا مقادیر نیروهای همبندی و گشتاورهای اعمالی در فرایند همبندی واقعی اندازه‌گیری شد. علاوه بر این هم زمان مقادیر تغییر طول پیچ‌ها به روش اولتراسونیک نیز اندازه‌گیری شد. در بخش سوم، آزمون‌های وظیفه‌ای عملکرد دو نوع پیچ مورد ارزیابی قرار گرفت. براساس گشتاور و نیروهای همبندی مقادیر ضریب اصطکاک برای هر پیچ در چند مرحله همبندی به‌صورت با و بدون پوشش محاسبه شد. سپس به‌منظور ارزیابی فرایند ساخت پیچ‌ها بر عمر قطعه در شرایط واقعی آزمون‌های خستگی انجام شد. در

بخش چهارم به بررسی پیچ سرسیلندر به روش عددی، میزان اثرگذاری پارامترهای مربوط به نیروهای خارجی و حرارت بر روی نیروی همبندی پیچ‌ها پرداخته و با مقادیر تحلیلی مقایسه شد که تطابق خوبی داشت. سپس عمر خستگی نامحدود پیچ سرسیلندر در بارهای اعمالی به صورت تجربی صحت‌گذاری شد. در پیچ‌های یاتاقان ثابت روش‌های ساخت متفاوت رزوه و کلگی مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج به دست آمده از این پژوهش به صورت زیر جمع‌بندی شده است:

- خواص مکانیکی و ترکیب شیمیایی پیچ‌های ساخته شده، به کمک آزمون‌های استاندارد DIN EN ISO 898-1 تعیین و کلاسه پیچ مشخص شد. تمامی پیچ‌ها در محدوده استاندارد کلاس ۱۲/۹ قرار داشتند.
- کنترل‌های ابعادی و هندسی پیچ‌های ساخته شده بر اساس استاندارد ISO پیچ‌های $M16 \times 1.5$ و $M18 \times 1.5$ انجام شد. شکل و هندسه پروفیل رزوه مطابق استاندارد بود. ابعاد پیچ در محدوده مجاز تolerانس‌های نقشه قرار داشت.
- نتایج تحلیلی میکروسکوپی از ناحیه کلگی و رزوه پیچ نشان دهنده این است که کلگی پیچ اصلی با روش فورج گرم و پیچ ساخته شده با روش فورج سرد انجام شده است. همچنین رزوه پیچ اصلی با روش نورد بعد از عملیات حرارتی و پیچ ساخته شده عملیات حرارتی بعد از نورد رزوه ساخته شده است. علاوه بر موارد فوق، پیچ سرسیلندر اصلی از جنس $36CrNiMo4$ می‌باشد که چقرمگی آن از پیچ سرسیلندر ساخته شده بیشتر است.
- تحلیل عددی تنش اجزای اتصال و پیچ به صورت سه‌بعدی به کمک نرم‌افزار آباکوس اجرا و بیشترین تنش بیشینه در عضوها و پیچ به ترتیب برابر با ۶۳۸ و ۱۱۶۲ مگاپاسکال محاسبه شد. با توجه به تنش تسلیم فشاری چدن خاکستری و تنش تسلیم کششی پیچ $M16 \times 1.5$ کلاس ۱۲/۹ که به ترتیب برابر با ۹۷۰ و ۱۲۱۱ مگاپاسکال است؛ سلامت اتصال تأیید شد.
- براساس آزمون کاغذ فوجی مقدار توزیع نیروی اعمالی پیچ‌ها در سرسیلندر تقریباً یکسان بوده و می‌توان آن را تائیدی برای محاسبات تحلیلی دانست. نتایج محاسبه نیروهای همبندی

باقی‌مانده در پیچ‌ها نشان دهنده حفظ شرایط آب‌بندی سرسپیندر در نیروهای احتراقی می‌باشد.

- به‌منظور تعیین ضریب اصطکاک و مقایسه نیروهای همبندی پیچ‌های ساخته شده و اصلی مقادیر نیروهای همبندی و گشتاورهای ورودی اندازه‌گیری شد. مقادیر ضریب اصطکاک برای پیچ‌های اصلی و ساخته شده نو و کارکرده به‌صورت با و بدون پوشش محاسبه شد. بر اساس گشتاورها و نیروهای همبندی از آزمون‌های تجربی و ضرایب اصطکاک محاسبه شده تنها ۱۰٪ تا ۱۵٪ از گشتاور اعمالی صرف ایجاد نیروی همبندی در پیچ‌ها می‌شود.
- نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که این پیچ‌های خاص موتور دیزل دریایی در تنش بسیار بالایی تا ناحیه پلاستیک همبندی می‌شوند. این نیروی محوری بالا در پیچ‌ها، باعث تغییراتی در ضریب اصطکاک در مراحل مختلف همبندی می‌شود. نتایج حاکی از این است که در اولین مرحله همبندی پیچ نو، تغییر شکل جزئی و پلاستیک رزوه باعث افت جزئی در نیروی همبندی می‌شود. در مراحل بعدی، افزایش ضریب اصطکاک در زیر گل پیچ می‌تواند در پیش‌بار تأثیر گذار باشد. عدم وجود پوشش فسفات روی اگرچه که رزوه با روغن هم روانکاری شود، باعث افزایش ضریب اصطکاک و کاهش نیروی همبندی با اعمال گشتاور می‌شود. در صورت استفاده از روش زاویه این اثر کاهشی را می‌توان تا حد زیادی برطرف کرد.
- براساس ضرایب اصطکاک محاسبه شده از گشتاورها می‌توان نیروهای همبندی را با دقت خوبی محاسبه نمود. محدوده نیروهای همبندی محاسبه شده نشان دهنده دقت مناسب استفاده از روش اعمال زاویه برای بستن پیچ‌ها تا ناحیه تسلیم می‌باشد.
- بر اساس اندازه‌گیری‌های اولتراسونیک، سرعت موج اولتراسونیک رابطه نسبتاً خطی با وجود تنش در ساق پیچ دارد. این تنش‌ها هم تنش‌های محوری و هم تنش‌های برشی ناشی از فرایند همبندی و وجود اصطکاک هستند. مقایسه نتایج این مطالعات و نتایج دیگر محققان نشان داد که تنش محوری عمده تأثیر را بر تغییرات سرعت موج اولتراسونیک می‌گذارد ولی وجود

تنش‌های برشی تا حدی می‌تواند باعث کاهش بیشتر سرعت موج هم در شرایط واقعی همبندی شود. در نهایت رابطه تغییرات موج اولتراسونیک بر حسب تنش اعمالی در یک فرایند همبندی واقعی به دست آمد که با استفاده از این رابطه می‌توان در فرایندهای مختلف تحقیقاتی و کاربردی، تخمین قابل قبولی از تغییر طول واقعی پیچ را در فرایند همبندی با استفاده از روش اولتراسونیک به دست آورد. بر اساس رابطه به‌دست آمده، نیروی همبندی در مطالعات مشابه با کمتر از ۱۰٪ تفاوت تخمین زده می‌شود.

- براساس شبیه‌سازی المان محدود و حل تحلیلی مقدار نیروهای دینامیکی پیچ سرسیلندر در دمای ۹۰ درجه سانتی‌گراد تخمین زده شد. آزمون خستگی به‌منظور ارزیابی عمر کارکرد پیچ بلند سرسیلندر انجام شد. آزمون خستگی (۱ میلیون سیکل) عمر بی‌نهایت پیچ را در شرایط کارکرد واقعی موتور تأیید می‌کند. لازم به ذکر است که در شرایط کارکرد واقعی موتور مذکور در شناور هم صحت این آزمون و نتایج آن را تأیید می‌کند.
- به‌منظور بررسی اثر فرایندهای ساخت، آزمون‌های خستگی بر روی پیچ یاتاقان ثابت در نیروهای همبندی ۵۳٪ و ۲۷٪ از تنش تسلیم انجام شد. نتایج آزمون خستگی نشان می‌دهد که پیچ‌های یاتاقان ثابت ساخته شده و اصلی از نظر عمر خستگی تفاوتی ندارند ولی مقطع شکست این دو پیچ در نیروی همبندی کم و تنش نوسانی زیاد متفاوت است. به‌گونه‌ای که پیچ‌های اصلی از ناحیه گل و پیچ‌های ساخته شده از ناحیه رزوه تسلیم می‌شوند.
- براساس نتایج به دست آمده، دوام خستگی گل پیچ‌هایی که به روش فورج سرد ساخته می‌شوند، بهتر از فرایند فورج گرم است. اگر نیروی همبندی کم و تنش سیکلی زیاد باشد عمر خستگی وابسته به رزوه است؛ اما اگر نیروهای همبندی زیاد و نیروی سیکلی کم باشد، حتی با انجام فرایند فورج سرد، پیچ از ناحیه کلگی می‌شکند؛ بنابراین در نیروهای همبندی بالا عمر خستگی وابسته به گل پیچ می‌باشد و هزینه ساخت رزوه بعد از عملیات حرارتی توجیه نخواهد داشت.

۵-۲- ارائه‌ی پیشنهادها

پس از انجام این پژوهش، پیشنهادهای زیر برای انجام مطالعه‌های آینده ارائه می‌شود:

- نمودار S-N برای تعیین دقیق رفتار خستگی پیچ‌های ساخته شده بر اساس استاندارد ISO با حداقل ۱۴ آزمون انجام شود.
- شبیه‌سازی المان محدود همبندی طبق فرایند توصیه شده سازنده موتور با اعمال گشتاور و زاویه انجام و با نتایج تجربی مقایسه شود.
- نیروهای سیکلی میل‌لنگ به‌صورت تحلیلی و المان محدود محاسبه شود و سپس اثرات آن بر روی نیروهای همبندی پیچ‌های یاتاقان کپه ثابت بررسی شده و بر این اساس آزمون‌های خستگی پیچ‌های ساخته شده انجام شود.
- اثر دما بر روی تغییرات سرعت موج اولتراسونیک در فلزات تحت تنش بررسی شود.
- اندازه‌گیری آنلاین نیروهای پیچ تحت اثر بارهای سیکلی موتور در حال کارکرد با استفاده از روش اولتراسونیک انجام شود.

منابع

- [1] VDI, "2230 Blatt 1: Systematic Calculation of High Duty Bolted Joints-Joints with One Cylindrical Bolt," VDI-Handbuch Konstruktion, 2003.
- [2] D. Croccolo, M. De Agostinis, and N. Vincenzi, "Failure analysis of bolted joints: Effect of friction coefficients in torque-preloading relationship," *Engineering Failure Analysis*, vol. 18, no. 1, pp. 364-373, 2011.
- [3] F. Toshimichi, and T. Tomohiro, "Elasto-plastic analysis of bolted joint during tightening process," *ASME, Design Engineering Division*, vol. 105, pp. 151-156, 1999.
- [4] T. Fukuoka, and T. Takaki, "Elastic plastic finite element analysis of bolted joint during tightening process," *Journal of Mechanical Design*, vol. 125, no. 4, pp. 823-830, 2003.
- [5] T. Fukuoka, and T. Takaki, "Mechanical behaviors of bolted joint during tightening using torque control," *JSME International Journal Series A Solid Mechanics and Material Engineering*, vol. 41, no. 2, pp. 185-191, 1998.
- [6] T. Fukuoka, and T. Takaki, "Evaluations of the tightening process of bolted joint with elastic angle control method." pp. 11-18.
- [7] S. Dravid, K. Tripathi, and M. Chouksey, "Role of Washers in Controlling loosening of Full Threaded Bolted Joints," *Procedia Technology*, vol. 14, pp. 543-552, 2014.
- [8] I. Argatov, and I. Sevostianov, "Health monitoring of bolted joints via electrical conductivity measurements," *International Journal of Engineering Science*, vol. 48, no. 10, pp. 874-887, 2010.
- [9] J. Williams, R. Anley, D. Nash, and T. Gray, "Analysis of externally loaded bolted joints: Analytical, computational and experimental study," *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, vol. 86, no. 7, pp. 420-427, 2009.
- [10] C. Lei, Y. tao Song, Z. Zhou, and W. Xu, "The loosening mechanism of screw bolts on the first wall graphite tiles in EAST," *Fusion Engineering and Design*, vol. 86, no. 9, pp. 1710-1713, 2011.
- [11] A. Taguchi, T. Kitami, S. Akamaru, and T. Abe, "Homogeneous surface coating of bolts, nuts, and screws by barrel-sputtering technique," *Surface and Coatings Technology*, vol. 201, no. 24, pp. 9512-9517, 2007.
- [12] K.-C. Kim, H. Yamawaki, J.-W. Park, H.-S. Jang, H.-J. Kim, W.-H. Hwang, and K.-Y. Jhang, "Research on the nondestructive measurement of nonlinear elastic modulus by using ultrasonic wave," *JSME International Journal Series A Solid Mechanics and Material Engineering*, vol. 44, no. 3, pp. 383-389, 2001.
- [13] R. Bergman, and R. Shahbender, "Effect of statically applied stresses on the velocity of propagation of ultrasonic waves," *Journal of Applied Physics*, vol. 29, no. 12, pp. 1736-1738, 1958.
- [14] R. Vilbrandt, M. Schröder, H. Allemann, and J.-H. Feist, "Quality assurance measures during tightening of various bolts at Wendelstein 7-X," *Fusion Engineering and Design*, vol. 84, no. 7, pp. 1941-1946, 2009.
- [15] K.-Y. Jhang, H.-H. Quan, J. Ha, and N.-Y. Kim, "Estimation of clamping force in high-tension bolts through ultrasonic velocity measurement," *Ultrasonics*, vol. 44, pp. e1339-e1342, 2006.

- [16] N. Kim, and M. Hong, "Measurement of axial stress using mode-converted ultrasound, NDT &," *E International*, vol. 42, 2009.
- [17] G. Hartmann, *Potentials and Limitations of Ultrasonic Clamp load Testing*, 0148-7191, SAE Technical Paper, 2007.
- [18] R. I. Stephens, N. J. Bradley, N. J. Horn, J. M. Arkema, and J. J. Gradman, "Influence of Cold Rolling Threads Before or After Heat Treatment on the Fatigue Resistance of High Strength Coarse Thread Bolts for Multiple Preload Conditions," *Journal of ASTM International*, vol. 3, no. 3, pp. 1-13, 2005.
- [19] N. Bradley, R. Stephens, N. Horn, J. Gradman, J. Arkema, and C. Borgwardt, "Influence of cold rolling threads before or after heat treatment on the fatigue resistance of high strength fine thread bolts for multiple preload conditions," *Journal of ASTM International*, vol. 3, no. 4, pp. 1-15, 2006.
- [20] N. Horn, and R. Stephens, "Influence of cold rolling threads before or after heat treatment on high strength bolts for different fatigue preload conditions," *Residual Stress Effects on Fatigue and Fracture Testing and Incorporation of Results into Design*: ASTM International, 2007.
- [21] S. Griza, M. E. G. da Silva, S. V. dos Santos, E. Pizzio, and T. R. Strohaecker, "The effect of bolt length in the fatigue strength of M24× 3 bolt studs," *Engineering Failure Analysis*, vol. 34, pp. 397-406, 2013.
- [22] W. Naville, A. Morassi, D. Leite, and R. Magnabosco, "Hydrogen stress cracking in power generator M42 galvanized martensitic carbon steel screws," *Engineering Failure Analysis*, vol. 56, pp. 257-264, 2015.
- [23] Z. Yu, and X. Xu, "Failure analysis of diesel engine cylinder head bolts," *Engineering Failure Analysis*, vol. 13, no. 5, pp. 826-834, 2006.
- [24] A. R. Kephart, "Optimum thread rolling process that improves SCC resistance," *Journal of ASTM International*, vol. 3, no. 7, pp. 1-6, 2006.
- [25] S. Ifergane, N. Eliaz, N. Stern, E. Kogan, G. Shemesh, H. Sheinkopf, and D. Eliezer, "The effect of manufacturing processes on the fatigue lifetime of aeronautical bolts," *Engineering Failure Analysis*, vol. 8, no. 3, pp. 227-235, 2001.
- [26] A. Marcelo, A. Uehara, R. Utiyama, and I. Ferreira, "Fatigue properties of high strength bolts," *Procedia Engineering*, vol. 10, pp. 1297-1302, 2011.
- [27] R. Misra, "Determine the Fatigue behavior of engine damper caps screw bolt," *International Journal of Computational Engineering Research*, vol. 2, no. 4, pp. 981-990, 2012.
- [28] H. Tschaetsch, *Metal forming practise: processes-machines-tools*: Springer Science & Business Media, 2007.
- [29] H.-C. Lee, Y.-G. Jin, Y.-H. Lee, I.-H. Son, D.-L. Lee, and Y.-T. Im, "Process design of high-strength bolt of fully pearlitic high-carbon steel," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 210, no. 14, pp. 1870-1875, 2010.
- [30] W. W. Chapman, *Modern Machine Shop's Guide to Threads, Threading and Threaded Fasteners* Hanser / Gardner Publications, 2004.
- [31] J. H. Bickford, *Introduction to the design and behavior of bolted joints: non-gasketed joints*: CRC Press, 2007.
- [32] Y.-L. Lee, and H.-C. Ho, "Design and Analysis of Metric Bolted Joints-Chapter 12: VDI Guideline and Finite Element Analysis," pp. 462-513, 2012.

- [33] V. D. Ingeneure, "VDI 2230: Systematic calculation of high duty bolted joints," *VDI-Gesellschaft Entwicklung Konstruktion Vertrieb*, 2003.
- [34] H. Yamashita, T. Makimae, K. Yoshizu, and S. Nakatani, *Development of plastic region tightening cylinder head bolts for new diesel engine*, 0148-7191, SAE Technical Paper, 1985.
- [35] A. V. Marathe, N. V. Marathe, and G. Venkatachalam, "Angular Torque Methodology for Cylinder Head Bolted Joint and Validation by FE and Experimental Work," *International Journal of Manufacturing, Materials, and Mechanical Engineering (IJMMME)*, vol. 6, no. 4, pp. 11-29, 2016.
- [36] A. C. Holt, B. Cunningham, G. C. Johnson, and D. Auslander, "An ultrasonic technique for axial bolt-stress determination," *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, pp. 1549-1557: Springer, 1987.
- [37] G. C. Johnson, A. C. Holt, and B. Cunningham, "An ultrasonic method for determining axial stress in bolts," *Journal of Testing and Evaluation*, vol. 14, no. 5, pp. 253-259, 1986.
- [38] N. Kim, and M. Hong, "Measurement of axial stress using mode-converted ultrasound," *NDT & E International*, vol. 42, no. 3, pp. 164-169, 2009.
- [39] D. Croccolo, M. De Agostinis, and N. Vincenzi, "A contribution to the selection and calculation of screws in high duty bolted joints," *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, vol. 96, pp. 38-48, 2012.
- [40] H. Y. K.C. Kim, J.W. Park, H.S. Jang, H.J. Kim, W.H., and K. Y. J. Hwang, "Research on the nondestructive measurement elastic modulus by using ultrasonic wave," *JSME International Journal Series A*, vol. 44, pp. 383, 2001.
- [41] J. K. Na, J. H. Cantrell, and W. T. Yost, "Linear and nonlinear ultrasonic properties of fatigued 410CB stainless steel," *Review of progress in quantitative nondestructive evaluation*, pp. 1347-1352: Springer, 1996.
- [42] E. DIN, "898-1, Mechanische Eigenschaften von Verbindungselementen aus Kohlenstoffstahl und legierten Stahl-Teil 1: Schrauben," *DIN-Deutscher Institut für Normung e*, vol. 1999, 1999.
- [43] S. A. Nassar, and A. B. Veeram, "Ultrasonic control of fastener tightening using varying wave speed," *Journal of pressure vessel technology*, vol. 128, no. 3, pp. 427-432, 2006.
- [44] H.-H. Q. Kyung-Young Jhang, Job Ha, Noh-Yu Kim, "Estimation of clamping force in high-tension bolts through ultrasonic velocity measurement," *Ultrasonics*, vol. 44, pp. e1339-e1342, 2006.
- [45] "Comprehensive materials database in Swiss company," <http://search.totalmateria.com/MaterialDetails/MaterialDetail?vkKey=1010482&keyNum=640&type=4&hs=0>.

[46] آتشزر، ح؛ قادری، س. ه؛ حسینی، س. و؛ منحنی مشخصه بارگذاری باربرداری و اشتر سرسیلندر فلزی موتور دیزل، سومین کنفرانس ملی و اولین کنفرانس بین المللی پژوهش های کاربردی در مهندسی برق؛ مکانیک و مکاترونیک، تهران؛ زمستان ۱۳۹۴.

پیوست

➤ تجهیزات اندازه گیری:

الف) آچاره گشتاور-زاویه



ب) دستگاه اولتراسونیک



ج) واشر نیروسنج



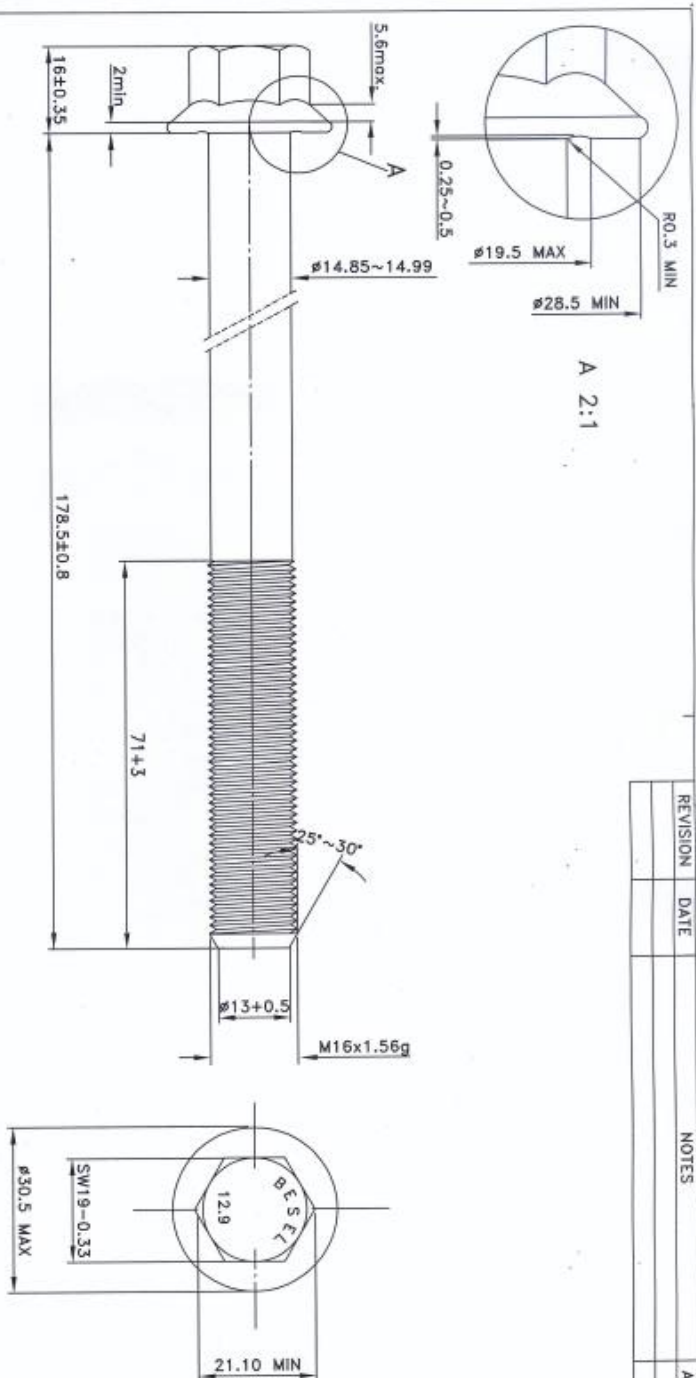
د) کالیبراتور به همراه واشر نیروسنج



و) دستگاه اینسترون ۸۸۰۲ به همراه سیستم کنترل رایانه‌ای



➤ نقشه:



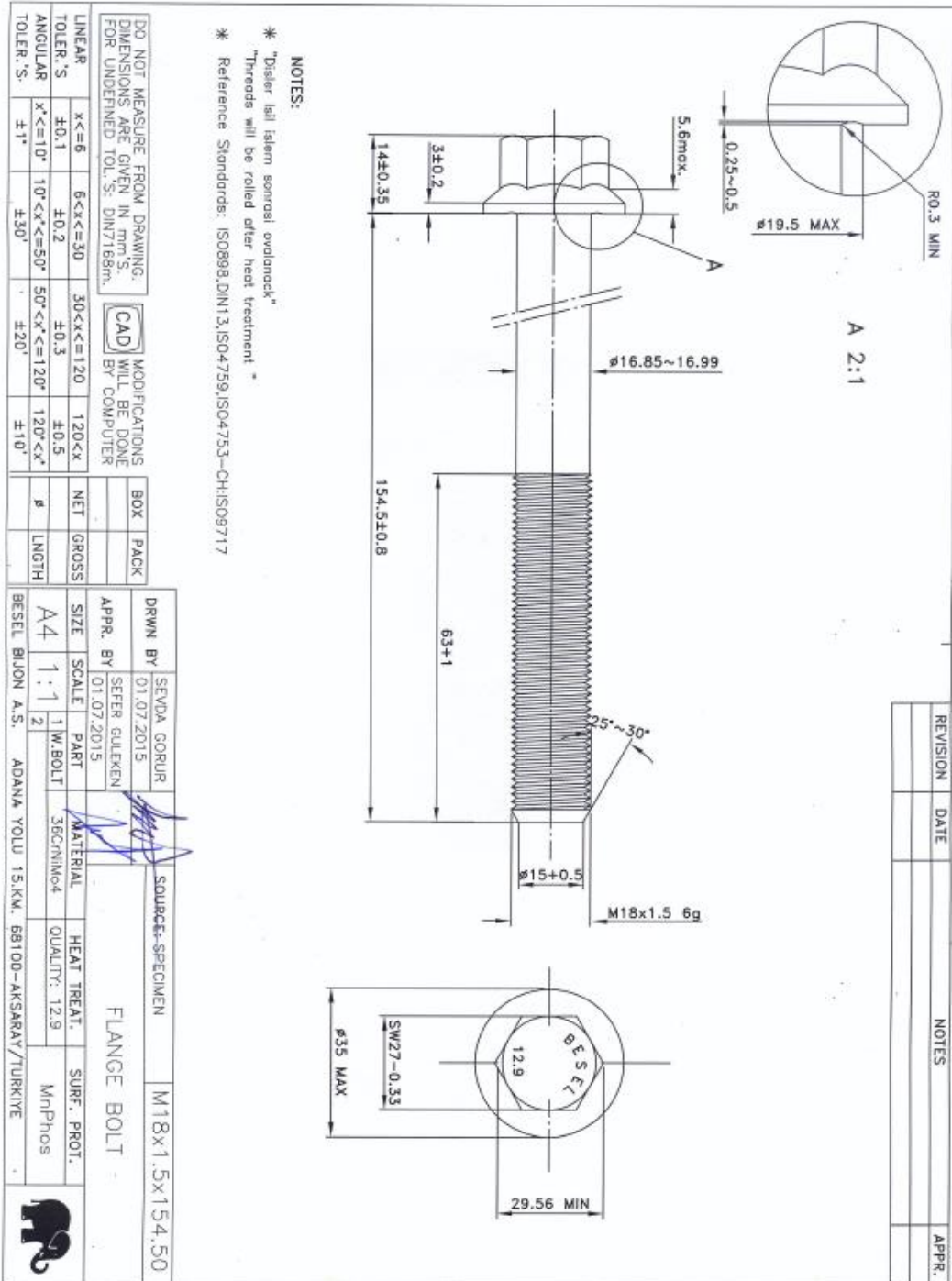
NOTES:

* "Disler Isil islem sonrosi ovalanack"

"Threads will be rolled after heat treatment."

* Reference Standards: ISO8998,DIN13,ISO4759,ISO4753-CH,ISO9717

DO NOT MEASURE FROM DRAWING. DIMENSIONS ARE GIVEN IN MM. FOR UNDEFINED TOL. S: DIN17168mm.		MODIFICATIONS WILL BE DONE BY COMPUTER		CAD	
LINEAR $x \leq 6$ $6 < x \leq 30$ $30 < x \leq 120$ $120 < x$		± 0.1 ± 0.2 ± 0.3 ± 0.5		TOLER.'S $x' \leq 10^\circ$ $10^\circ < x' \leq 50^\circ$ $50^\circ < x' \leq 120^\circ$ $120^\circ < x'$	
TOLER.'S $\pm 1^\circ$ $\pm 30'$ $\pm 20'$		$\pm 10'$ $\pm 20'$ $\pm 10'$		TOLER.'S $\pm 1^\circ$ $\pm 30'$ $\pm 20'$	
NET GROSS LENGTH		BOX PACK		DRAWN BY 01.07.2015 APPR. BY 01.07.2015	
SIZE SCALE PART 1 W. BOLT		SEVDA GORUR SETER GULEKEN 1/1 1/1		SOURCE: SPECIMEN M16x1.5x178.5	
MATERIAL 36CrNiMo4 QUALITY: 12.9 SURF. PROT. MnPhos		FLANGE BOLT		ADANA YOLU 15.KM. 68100-AKSARAY/TÜRKİYE	

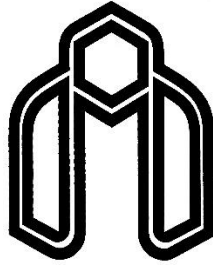


Abstract

High-RPM diesel engines have large power to weight ratio, which causes increased cyclic thermal and mechanical tension in the engine, that directly affects bolts function and cause a complicated situation. Estimating the exact amount of clamping force, the relation between torque and pre-loading force, friction coefficient, functional forces, bolts fatigue life during high pre-loading forces are the main issues of specific bolts joints with high strength. In this research, first, the process of high-strength bolt clamping in a high-RPM marine diesel engine with torque-angle clamping method is studied analytically and experimentally. After finding the accuracy of the manufactured bolt in class 12/9 applied torque, ultrasonic lengths changes and also clamping forces in all steps were measured. In order to investigate the effects of different parameters on clamping process, the new and worked manufactured bolts were applied and their functions have been compared. In addition to that, in order to find out the effect of coating, the bolts friction coefficient in 2 situations (with and without phosphate coating) were studied. The results show that in the first step of clamping the new manufactured bolts small plastic deformation in the thread position cause reduction of clamping force. In the next steps, it's observed that increasing the friction coefficient under the head of bolt can affect clamping force. Also, lack of phosphate-zinc coating, although the thread was greased, can increase the friction coefficient and decrease the clamping force, which can be controlled by the angular clamping method. In the length-changing measuring by the ultrasonic method, it's observed that changes in the speed of ultrasonic wave have approximately linear changes on clamping stress in the shaft of the bolt. Checking the results of this study show that axial stress has the main effects on ultrasonic wave's changes, but shear stress can reduce the speed of the wave. In total, the relation between ultrasonic wave's changes and applied stress in a real clamping process to the plastic area is calculated. By this formula, we can estimate the clamping force with 10% error. Next, by the calculated friction coefficient, the amount of clamping force estimated in real condition then the effect of external forces and heat is studied analytically and experimentally. In order to study on bolts function in the situation of the engine working, fatigue test is done which verified the unlimited life time of bolt in internal combustion engines.

In the following, in order to find the effects of the manufacturing process on the fixed bearing bolt the comparative fatigue tests are done. The results illustrate in low clamping force and high fluctuating force, threading after heat treatment have better function than threading before heat treatment. The process of manufacturing of bolts head in similar loading, the durability of cold forge fatigue is better than the hot forge. While by moving forward to the loading condition of clamping and real situation of the engine working, failure is on the thread instead of the head.

Keywords: High-tention bolt, Ultrasonic method, Fatigue, Clamping force, Diesel engine.



Shahrood University of technology
Faculty of Mechanical and Mechatronics Engineering

M.Sc. Thesis in Manufacturing and Production Engineering

**Effect of Thread Manufacturing Parameters on Friction Coefficient
and Fatigue Life in Cylinder Head and Journal Bearing Bolts of
Marine Diesel Engine**

By: Shahab Moradi Kellardeh

Supervisor
Dr.Seyed Vahid Hosseini

Advisor
Dr.Mohammad Bagher Nazari

September 2017