



## فصلنامه علمی - پژوهشی تحقیقات موتور

تارنمای فصلنامه: [www.engineersearch.ir](http://www.engineersearch.ir)



### بررسی اثر تنش ناشی از همبندی بر سرعت موج فراصوت در پیچ بستار موتور دیزل

شهاب مرادی کلارده<sup>۱</sup>، سید وحید حسینی<sup>۲\*</sup>

<sup>۱</sup> دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران، [Sh.moradi@shahroodut.ac.ir](mailto:Sh.moradi@shahroodut.ac.ir)

<sup>۲</sup> دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران، [V\\_hosseini@shahroodut.ac.ir](mailto:V_hosseini@shahroodut.ac.ir)

\* نویسنده مسئول

#### اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

دریافت: ۸ تیر ۱۳۹۶

پذیرش: ۲۸ فروردین ۱۳۹۷

کلیدواژه‌ها:

پیچ استحکام قوی

روش فراصوت

تغییرات سرعت موج

نیروی همبندی

بستار موتور دیزل

#### چکیده

برآورد دقیق نیروی همبندی در پیش‌بارهای قوی یکی از اصلی‌ترین موضوعها در اتصال پیچ‌های خاص با استحکام قوی است. این تحقیق روشی را برای برآورد نیروهای همبندی بر اساس سرعت موج فراصوت (س.م.ف.) با استفاده از روش پژواک ارائه می‌دهد. در این پژوهش تأثیر تنش‌های ناشی از فرایند همبندی بر تغییر س.م.ف. بررسی می‌شود. برای اینکار نیروهای فرایند همبندی پیچ استحکام قوی بستار در موتور دیزل دریایی دور تند با روش گشتاور-زاویه مطالعه شد. به‌منظور بررسی تأثیر عوامل مختلف، پیچ به‌صورت نو و کارکرده، در دو حالت پوشش‌دار و بدون پوشش استفاده شد. در تمام مراحل همبندی به‌صورت هم‌زمان، تغییر طول فراصوت، گشتاور همبندی و همچنین نیروی پیش‌بار پیچ اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که در اولین مرحله همبندی پیچ نو، تغییر شکل جزئی دائمی رزوه باعث کاهش نیروی پیش‌بار می‌شود. در مراحل بعدی، افزایش ضریب اصطکاک در زیر گل پیچ می‌تواند در پیش‌بار تأثیرگذار باشد. همچنین عدم وجود پوشش فسفات روی نیز باعث افزایش ضریب اصطکاک و کاهش نیروی پیش‌بار می‌شود. در صورت استفاده از روش همبندی زاویه‌ای، اثر کاهشی فوق را می‌توان تا حد زیادی پایش کرد. س.م.ف. معادله نسبتاً خطی با تنش همبندی پیچ دارد. مقایسه نتایج این پژوهش‌ها و دیگر محققان نشان داد که تنش محوری عمده تأثیر را بر تغییرات س.م.ف. می‌گذارد ولی وجود تنش‌های برشی نیز تا حدی می‌تواند باعث کاهش بیشتر سرعت موج شود. در نهایت معادله تغییرات س.م.ف. بر حسب تنش اعمالی در یک فرایند همبندی واقعی تا محدوده دائمی به‌دست آمد که با استفاده از این معادله می‌توان با دقت ۱۰٪ نیروی همبندی پیچ را تخمین زد.



تمامی حقوق برای انجمن علمی موتور ایران محفوظ است.

## ۱- مقدمه

روش‌های همبندی با در نظر گرفتن دستیابی به پیش‌بارهای دقیق یکی از اصلی‌ترین موضوعات در اتصالات پیچ‌ها است. نیروی پیش‌بار زیاد یا ناکافی اتصالات، عامل اصلی بسیاری از خرابی‌ها است. در فرایند تولید، تعمیر و نگهداری تجهیزات، تکرارپذیری اعمال نیروی پیش‌بار در پیچ‌های استحکام قوی جزء مباحث مهم است.

چندین روش برای اندازه‌گیری غیرمستقیم نیروی همبندی و تغییرات طول پیچ وجود دارد که شامل استفاده از آچار گشتاور-زاویه عددی [۱-۴]، روش‌های تشخیص تغییرات طول اتصالات با استفاده از اندازه‌گیری کرنش و یا روش‌های پیچیده‌تر مانند فراصوت [۵، ۶] است.

گزارش‌ها در استفاده از آچار گشتاورسنج خطای ذاتی فاجعه‌آمیز نیروی همبندی را تا بیشتر از ۵۰٪ نشان داده است. زمانی که پیچ‌های یکسان با گشتاور برابری بسته می‌شوند، اساساً کشش‌های یکسانی به پیچ‌ها اعمال نخواهد شد. این پدیده بیشتر به دلیل تغییرات ضریب اصطکاک در پیچ‌ها به وجود می‌آید.

عموماً اصطکاک سبب تحلیل رفتن ۹۰٪ گشتاور اعمالی می‌شود که ۵۰٪ آن صرف غلبه بر اصطکاک زیر گل پیچ و ۳۵٪ آن صرف غلبه بر اصطکاک بین رزوه‌ها می‌شود و تنها ۱۵٪-۱۰٪ از گشتاور اعمالی به کشش در پیچ تبدیل می‌شود. به‌علاوه تفاوت ضریب اصطکاک از پیچ تا پیچ دیگر حتی با اعمال گشتاور دقیق عموماً سبب خطا تا ۵۰٪ خواهد شد [۷]. این مقدار از خطای نیروی همبندی سبب دشواری‌هایی در طراحی اتصالات پیچی به‌خصوص در اتصالات بحرانی می‌شود.

بنابراین به‌منظور مستقل کردن نیروهای همبندی از ضریب اصطکاک از روش پایش زاویه دوران پیچ استفاده شد. در این روش معادله بین زاویه دوران و نیروی محوری در ناحیه کشسان<sup>۱</sup> خطی است. در ابتدای فرایند همبندی، مقداری گشتاور تا نقطه شروع خطی شدن نیروی محوری اعمال می‌شود. این ناحیه به‌عنوان نقطه<sup>۱</sup> Sung معرفی می‌شود (شکل ۱). استاندارد ژاپن<sup>۲</sup>، مقدار گشتاور مورد نیاز برای رسیدن به این نقطه را پیشنهاد می‌کند.

عموماً در همبندی قطعات قوای محرکه موتوری تعیین مقدار مناسب گشتاور، پیچیده است و اغلب مواقع در موتورهای دیزل از روش ترکیبی همبندی با پایش زاویه و گشتاور استفاده می‌شود. حدود ۴۰٪ از نیروی پیش‌بار با گشتاور و باقی مانده آن با پایش زاویه اعمال می‌شود [۱]. از روش همبندی پایش زاویه‌ای در ناحیه کشسان یا کشسان-دائمی<sup>۳</sup> پیچ در نیروهای همبندی قوی و در اتصالات با طول بلند استفاده می‌شود. روش پایش زاویه‌دائمی در مقایسه با روش پایش زاویه کشسان قابلیت اعمال نیروی محوری دقیق‌تر را دارد و معمولاً برای همبندی برخی از

قطعات در سامانه قوای محرکه به کار می‌رود اما مشکل‌های استفاده دوباره پیچ‌ها وجود خواهد داشت.

در همبندی قطعات مهم موتورهای دیزل با ابعاد متوسط یا بزرگ از روش پایش زاویه کشسان به وسعت استفاده می‌شود؛ زیرا این پیچ‌ها اساساً برای استفاده‌های مجدد در دوره‌های زمانی طولانی‌تر طراحی شده‌اند. از دیدگاه عملی روش پایش زاویه کشسان لزوماً دارای پراکندگی قابل قبولی از نیروی همبندی پیچ است که می‌توان با آموزش و ارائه دستورالعمل، مقدار این پراکندگی‌ها را کاهش داد [۱]. با این حال پیدا کردن ناحیه کشسان در آزمون تجربی دشوار است. به همین خاطر محققان از کرنش‌سنج برای اندازه‌گیری کرنش پیچ برای دستیابی به تنش استفاده می‌کنند [۸-۱۰] که باید تغییراتی در ساختار پیچ داده شود که این خود باعث سستی استحکام پیچ و پیدایش خطا در فرایند اندازه‌گیری می‌شود. علاوه بر این اضافه کردن کرنش‌سنج بر روی پیچ در حین همبندی واقعی دارای دشواری‌هایی است.

فوکویکا و تاکاکی در همبندی با روش پایش گشتاور تمرکز تنش در رزوه‌ها، تغییر شکل دائمی و اثرات آن بر رفتار مکانیکی اتصال پیچ به روش المان محدود بررسی کردند [۱۱].

علاوه بر آن اصطکاک به‌عنوان یک عامل اثرگذار مهم بر رفتار مکانیکی اتصال پیچ مانند تغییرات نیروی محوری و گشتاور به هنگام بستن به‌صورت تجربی و عددی مطالعه شد. از این رو ضریب اصطکاک سطوح فشار رزوه و سطح بارگذاری مهره با اندازه‌گیری گشتاور اعمالی کل به مهره، کشش محوری و گشتاور اصطکاک رزوه تخمین زده شد [۱۲].

در روش فراصوت اساس اندازه‌گیری، تغییرات طول بر پایه زمان انتشار موج (ز.ا.م)<sup>۴</sup> است که قابلیت اندازه‌گیری آسان نیروی همبندی پیچ را دارد. برای تعیین نیروی همبندی در این روش نیاز به آگاهی از طول اولیه پیچ قبل از بستن و جنس فلز (ضریب کشسان و چگالی) است. آگاهی از این مقادیر به‌خصوص در پیچ‌هایی که قبلاً بسته شده‌اند و یا پیچ‌هایی که همانند یکدیگر نیستند، دشوار است.

اگر در فرایند ساخت پیچ‌ها عملیات حرارتی انجام گرفته باشد، دانستن مقادیر دقیق ضریب کشسان دشوار است. ارزیابی‌های غیرمخرب فراصوت برای تعیین ثابت‌های کشسان بر روی بلور فلزات با اندازه‌گیری سرعت موج‌های فراصوت متفاوت (برای مثال اندازه‌گیری دو س.م.ف. از سه مقادیر موج طولی، برشی و سطحی) انجام گرفته است.

با این حال تلاشی برای اندازه‌گیری مستقیم سرعت انتشار موج فراصوت با استفاده از آزمون Round-robin انجام نشده است؛ زیرا بیشینه تغییرات سرعت انتشار موج در نزدیکی نقطه تسلیم برابر ۱٪ است [۷].

<sup>3</sup> Plastic

<sup>4</sup> Time of flight (TOF)

<sup>1</sup> Elastic

<sup>2</sup> Japanese Industrial Standards

موج فراصوت استفاده می‌کند. آن‌ها در نهایت مقادیر نتایج شبیه‌سازی را با نتایج تجربی صحت‌گذاری کردند [۱۸].

باقلالیان و همکاران شل شدن اتصال پیچ با استفاده از موج فراصوت بسامد کم را بررسی کردند که از این روش می‌توان به‌عنوان پشتیبان حسگرها استفاده کرد [۱۹].

همچنین میرسا در مطالعه رفتار خستگی پیچ مستهلک‌کننده موتور برای تعیین نیروی همبندی از روش فراصوت با موج طولی و برشی استفاده نمود [۲۰].

پیکاسو و همکاران نیز رفتار خستگی اتصال پیچی ورق فلزی تحت بارهای نوسانی خمشی را بررسی کردند که به‌منظور برآورد دقیق نیروی همبندی از روش فراصوت با موج طولی استفاده کردند [۲۱].

بر اساس تحقیقات، عموماً تغییرات س.م.ف. در پیچ در محدوده کوچک کشسان و یا به‌صورت اعمال کشش خالص بررسی شده است. این در حالی است که در بارگذاری واقعی پیچ‌های خاص از جمله پیچ بستار موتور دیزل دریایی، پیچ تا ناحیه تغییر شکل دائمی تحت پیش‌بار قرار می‌گیرد. همچنین در فرایند همبندی، پیچ به‌صورت هم‌زمان تحت تنش‌های محوری ناشی از پیش‌بار و تنش‌های برشی ناشی از گشتاور همبندی قرار خواهد گرفت که این عوامل علاوه بر نوع و مشخصات پیچ و رزوه، به مقدار ضریب اصطکاک بخش‌های مختلف وابسته است که می‌تواند در مقدار تغییرات س.م.ف. تأثیرگذار باشد. در مطالعه حاضر اثرات این عوامل در شرایط مختلف کارکرد پیچ به‌صورت نو و کارکرده، در دو حالت پوشش‌دار و بدون پوشش بررسی می‌شود.

## ۲- روش تحقیق

### ۲-۱- تنش و سرعت موج فراصوت (س.م.ف.)

معادله تنش و کرنش بر اساس نظریه کشسان خطی با ثابت کشسان مرتبه دوم به‌صورت یک خط بیان می‌شود. در این حالت سرعت ثابت موج فراصوت را می‌توان با صرف‌نظر از تنش به‌عنوان تابعی از ثابت کشسان مرتبه دو و چگالی بیان کرد. این در حالی است که بر اساس شکل ۱ معادله بین تنش و کرنش در محدوده کشسان غیرخطی است.

برای غیرخطی بین تنش و س.م.ف.، تنش  $\sigma$  و کرنش  $\epsilon$  با ثابت خطی کشسان  $f$  و ثابت‌های کشسان غیرخطی مرتبه سه  $g$  در معادله ۱ بیان می‌شود [۱۴].

$$\epsilon_i = f_{ij}\sigma_j + g_{ijkl}\sigma_j\sigma_k \quad i, j, k = 1, \dots, 6 \quad (1)$$

برای استخراج معادله بین تنش و س.م.ف. بر اساس ثابت‌های کشسان غیرخطی از معادله ۱ و نظریه موج کشسان خطی از مرجع [۲۲] استفاده شد. حال می‌توان به بررسی انتشار موج فراصوت طولی با دامنه  $A$ ، بسامد  $\omega$  و تعداد موج  $k$  در پیچ تحت بارگذاری محوری پایدار که در شکل ۲ نشان داده شده است، پرداخت.

در عوض برای اندازه‌گیری تغییر طول پیچ از تغییرات ز.ا.م. فراصوت در طول پیچ استفاده می‌شود. از آنجائی که مقادیر اندازه‌گیری تغییر طول پیچ تحت کشش با فراصوت شامل تغییر طول کشسان واقعی پیچ به همراه خطای ناشی از کاهش ز.ا.م. به دلیل تنش کششی و تغییرات چگالی در پیچ است، تغییرات ز.ا.م. فراصوت در فلزات تحت تنش باید تنظیم شود. به‌منظور کاهش این مشکل‌ها، یاسوی و همکاران روش نسبت سرعت را برای دو موج متفاوت صدا مانند موج طولی و برشی را معرفی نمود که برای به دست آوردن نسبت زمان انتشار و محاسبه نیروی پیچ استفاده می‌شود [۱۳].

س.م.ف. در رفتار کشسان خطی تنها به ضریب کشسان و متوسط چگالی محاسبه می‌شود. در حقیقت س.م.ف. وابسته به تنش است که این وابستگی غیرخطی است. در این راستا کیم و همکاران کشسان غیرخطی را معرفی کردند [۱۴]. به‌علاوه نسبت ضریب کشسان غیرخطی را تا مرتبه چهار محاسبه کردند و روی تنش داخلی با آزمون تجربی و شبیه‌سازی بحث کردند. نتایج نشان می‌داد که ثابت کشسان مرتبه سوم در شیب منحنی س.م.ف. و تنش در ناحیه دائمی دخالت دارد که با نتایج تجربی تطابق خوبی داشت.

برگرمین و شاهبندر تغییرات سرعت تجربی موج فراصوت طولی و برشی در جهت عرضی آلومینیوم تحت تنش را بررسی کردند. نتایج تجربی نشان داد که تغییرات سرعت موج طولی فراصوت مستقل از تغییرات ضریب کشسان و وابسته به تغییرات چگالی است اما تغییرات سرعت در موج‌های برشی علاوه بر چگالی و ضریب یانگ به نوع موج برشی (عمودی و افقی) نیز وابسته است [۱۵].

ویلبراندت و همکاران از روش فراصوت برای اندازه‌گیری پیش‌بار پیچ‌های استحکام قوی که به‌منظور غلبه بر بارهای مکانیکی در سامانه آهنربایی تا مرز تسلیم بسته شده بودند، استفاده کردند. در این تحقیق ضریب یانگ، س.م.ف. و دما عوامل تأثیرگذار بر متغیر اندازه‌گیری بود که برای هر پیچ با جنس و ابعاد مختلف فرایند تنظیم انجام گرفت [۱۶].

جی هانگ و همکاران نیز تنش پیچ‌ها بر اساس س.م.ف. و ز.ا.م. را محاسبه کردند. نتایج نشان داد که با افزایش گشتاور همبندی س.م.ف. کاهش می‌یابد [۱۷]. در سامانه‌های کاربردی تعمیر و نگهداری، تشخیص شروع و گسترش عیوبی مانند ترک، شل شدن پیچ‌ها و ... در مراحل اولیه بسیار مهم است.

هو و همکاران بر اساس نظریه تماس شکست نامنظم<sup>۱</sup>، روشی عددی جدید برای پایش شل شدن اتصالات پیچی با استفاده از موج فراصوت ایجاد شده توسط مبدل پیزوالکتریک را ارائه دادند که از روش معکوس زمان برای به‌دست آوردن دامنه قلّه علامت<sup>۲</sup> متمرکز در هنگام انتشار

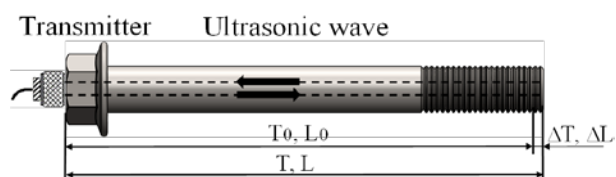
<sup>2</sup> Signal

<sup>1</sup> Fractal

زمانی که از معادله ۶ برای محاسبه تنش محوری پیچ استفاده می شود دقت اندازه گیری س.م.ف. اهمیت می یابد زیرا تغییرات س.م.ف. در محدوده تنش همبندی تا نقطه تسلیم بسیار کوچک است.

## ۲-۲- اندازه گیری سرعت فراصوت

نحوه اندازه گیری سرعت فراصوت در شکل ۳ نشان داده شده است. موج فراصوت توسط مبدل از بالای سطح سنگ خورده گل پیچ به داخل پیچ فرستاده و پس از برخورد به انتهای پیچ منعکس شده و توسط مبدل دریافت و در نهایت زمان حد فاصل بین ارسال و دریافت به عنوان ز.ا.م.<sup>۱</sup> TOF اندازه گیری می شود.



شکل ۳: اندازه گیری ز.ا.م.

سرعت فراصوت در طول انتشار L و ز.ا.م. از معادله ۷ محاسبه می شود.

$$C = \frac{2L}{T} \quad (7)$$

از آنجا که طول انتشار در اثر اعمال تنش به علت بارگذاری تغییر می یابد، س.م.ف. از معادله ۸ محاسبه می شود.

$$C = \frac{2(L_0 + \Delta L)}{T_0 + \Delta T} = C_0 + \Delta C \quad (8)$$

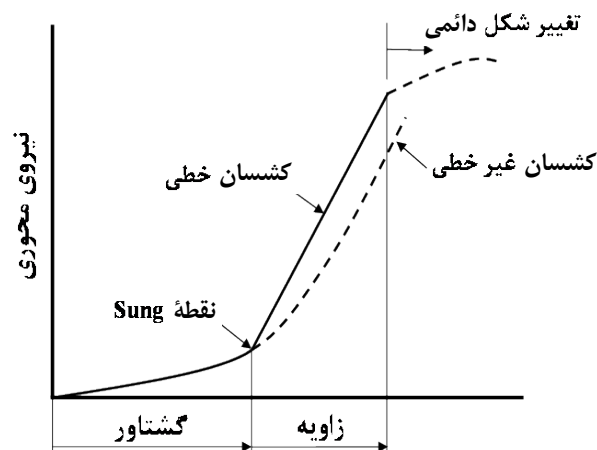
$T_0$  و  $L_0$  بترتیب بیان کننده زمان اولیه انتشار موج و طول اولیه در هنگام عدم اعمال تنش می باشند و  $\Delta T$  تغییرات ز.ا.م. و  $\Delta L$  تغییرات طول با اعمال تنش هستند. سرعت اولیه موج فراصوت  $C_0$  از تقسیم  $L_0/T_0$  محاسبه می شود و  $\Delta C$  تغییرات سرعت فراصوت حاصل از اعمال تنش محوری است.

معادله ۹ نرخ تغییرات سرعت فراصوت با نادیده گرفتن جمله های با مرتبه دو و بزرگتر از معادله ۸ به دست آمده است.

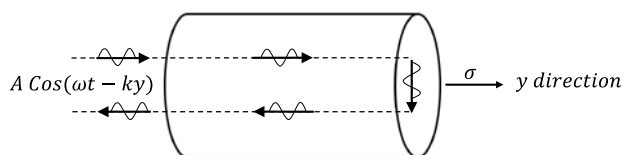
$$\frac{\Delta C}{C_0} = \frac{\Delta V}{V_0} + \frac{\Delta L}{L_0} \quad (9)$$

در این معادله V سرعت ظاهری است که به صورت  $2L_0/T$  در این معادله  $V_0 = 2L_0/T_0 = C_0$  و  $\Delta V = V - V_0$  تعریف می شود.

با ترکیب معادلات ۶ و ۹، پس از جایگذاری کرنش به جای  $\Delta L/L_0$  معادله مستقیمی از تنش و ز.ا.م. به دست می آید؛ بنابراین تنش می تواند به صورت مستقیم تنها با اندازه گیری ز.ا.م. و دانستن ثابت های ماده ( $\beta$ ,  $C_0$ , E) و با در نظر گرفتن طول اولیه  $L_0$  تخمین زده شود. برای تأیید  $\Delta C/C_0$  مقادیر کرنش و ز.ا.م. با معادله ۹ اندازه گیری شد که معادله خطی آن با تنش در معادله ۹ نشان داده شده است. حال با دانستن تغییرات سرعت صوت نسبت به سرعت اولیه  $\Delta C/C_0$  می توان تغییر



شکل ۱: وابستگی بین نیروی محوری، گشتاور و زاویه دوران پیچ [۱]



شکل ۲: انتشار موج فراصوت در پیچ تحت تنش محوری

بنابراین کرنش  $\epsilon$  در جهت محوری به بسامد موج فراصوت از معادله ۲ و ۳ وابسته است [۱۴].

$$\epsilon_2 = A \cos(\omega t - ky) \times (f_{22} + 2g_{222}\sigma) \quad (2)$$

$$\epsilon_2 = \frac{k^2}{\rho\omega^2} A \cos(\omega t - ky) \quad (3)$$

با برابر هم قرار دادن معادله ۲ و ۳ می توان س.م.ف. C را از معادله ۴ محاسبه نمود.

$$C = \frac{\omega}{k} = [\rho(f_{22} + 2g_{222}\sigma)]^{-1/2} \quad (4)$$

معادله ۴ برای ثابت کشسان تا مرتبه سه در جهت محوری y بیان شده است. با دانستن مقادیر ثابت  $g_{222}$  از آزمون تجربی می توان تغییرات س.م.ف. در تنش های مختلف را محاسبه کرد.

با تعریف متغیر  $\beta$  که از تقسیم ثابت نسبت کشسان غیرخطی و ثابت کشسان خطی  $g_{222}/f_{22}$  بیان می شود، معادله ۴ را می توان به صورت معادله ۵ بازنویسی کرد.

$$C = C_0 \frac{1}{\sqrt{1 + 2\beta\sigma}} \quad (5)$$

زمانی که هیچ تنشی به پیچ اعمال نشده باشد، سرعت طولی موج فراصوت  $C_0$  برابر  $1/(\rho f_{22})^{-1/2}$  است. با توجه به بسیار کوچک بودن مقدار غیرخطی نسبت به مقدار خطی، معادله غیرخطی ۵ را می توان تا نقطه تسلیم به صورت معادله ساده خطی ۶ بیان نمود.

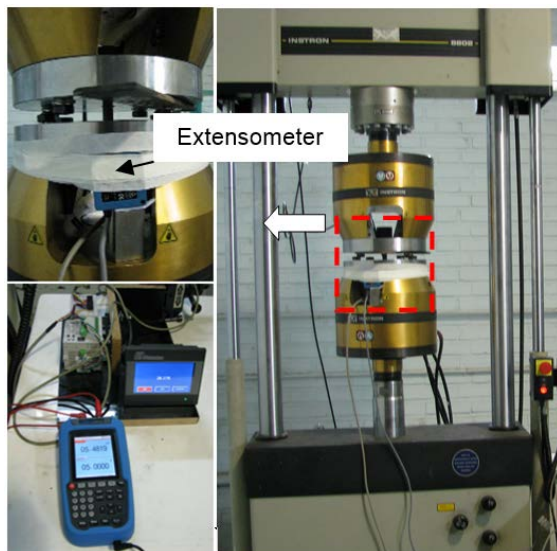
$$C = C_0(1 - 2\beta\sigma) \quad (6)$$

<sup>1</sup> Time of flight

اندازه‌گیری ز.ا.م. استفاده شد. برای کاهش ضریب بازتاب سطح سنگ خورده گل پیچ از یک سیال مخصوص به‌عنوان ماده واسط استفاده شد. آزمون کشش پیچ و تنظیم لائی نیروسنج به همراه کشش‌سنج<sup>۱</sup> نوری روی دستگاه کشش INSTRON 8808 انجام گرفت (شکل ۵). با دانستن  $C_0$  و اندازه‌گیری  $L$  با استفاده از دستگاه فراصوت و جایگذاری در معادله ۱، ز.ا.م. فراصوت قابل محاسبه خواهد بود. سپس با داشتن تغییر طول واقعی پیچ در تنش‌های معادل (با استفاده از لائی نیروسنج و کشش‌سنج نوری) می‌توان مقدار نسبت  $\Delta C/C_0$  را محاسبه کرد. نتایج آزمون کشش به‌منظور تعیین محدوده رفتار کشسان-دائمی پیچ در نیروهای همبندی در جدول ۲ نشان داده شده است.



شکل ۴: اندازه‌گیری ز.ا.م. به همراه لائی نیروسنج



شکل ۵: آزمون کشش و تنظیم لائی نیروسنج با کشش‌سنج نوری

طول ناشی از همبندی پیچ را از معادله ۱۰ محاسبه نمود. با جایگذاری کرنش به جای تغییر طول به طول اولیه  $\Delta L/L_0$  پیچ، معادله مستقیمی از تنش به دست می‌آید که برآورد نیروی همبندی را امکان‌پذیر می‌سازد.

$$\Delta L = L_0 \left( \frac{\Delta C}{C_0} - \frac{\Delta V}{V_0} \right) = L_0 \left( \frac{\Delta C}{C_0} - \frac{2L_0}{TC_0} - 1 \right) \quad (10)$$

### ۳-۲- آزمون تجربی

در این آزمون پیچ استحکام قوی بستار  $M16 \times 1,5$  طبقه ۱۲,۹ در موتور دیزل دریایی دور تند با روش همبندی گشتاور-زاویه مطالعه شده است. ترتیب بستن تدریجی پیچ بر اساس رویه تولیدکننده موتور مطابق جدول ۱ است.

جدول ۱: ترتیب بستن پیچ‌ها

پیچ بستار	ترتیب بستن
۱۰	۱-گشتاور (N.m)
۸۰	۲-گشتاور (N.m)
۱۶۰	۳-گشتاور (N.m)
۲۵۰	۴-گشتاور (N.m)
۹۰	۵- زاویه (درجه)
۹۰	۶- زاویه (درجه)

گشتاور مراحل ۱ تا ۴ با استفاده از آچار گشتاور اعمال شد. همچنین برای اعمال زاویه‌های مراحل ۵ و ۶ از آچار گشتاور-زاویه دیجیتالی استفاده گردید که قابلیت اندازه‌گیری زاویه دوران و گشتاور اعمالی معادل را داشت. به علاوه از لائی نیروسنج (با اندازه‌گیری کرنش) برای اندازه‌گیری نیروی همبندی پیچ استفاده شد. برای بررسی اثرات استفاده مجدد از پیچ‌ها در فرایندهای تعمیر و نگهداری، آزمون همبندی برای یک پیچ ۳ مرتبه تکرار شد که در مرحله سوم پوشش فسفات روی آن حذف گردید.

برای همبندی و پایش صحیح ضرایب اصطکاک، تمامی پیچ‌ها قبل از همبندی با بنزین شسته، باد گرفته و سپس با روغن ایرانول  $20W50$  روانکاری شدند. همچنین سوراخ رزوه بدنه موتور نیز تمیز شد. برای اندازه‌گیری تغییر طول پیچ در اثر تنش‌های همبندی از دستگاه فراصوت با نام تجاری OLYMPUS-25DL PLUS با دقت  $0,01$  میلی‌متر استفاده گردید.

شکل ۴ چگونگی اجرای آزمون بر روی بدنه موتور، اندازه‌گیری طول پیچ و نیروی پیش‌بار را نشان می‌دهد. به‌منظور افزایش دقت، طول پیچ قبل و بعد از همبندی با کولیس عددی اندازه‌گیری شد. مبدل فراصوت با بسامد در بازه  $2,5-30$  مگاهرتز در بالای سطح سنگ‌زنی پیچ برای

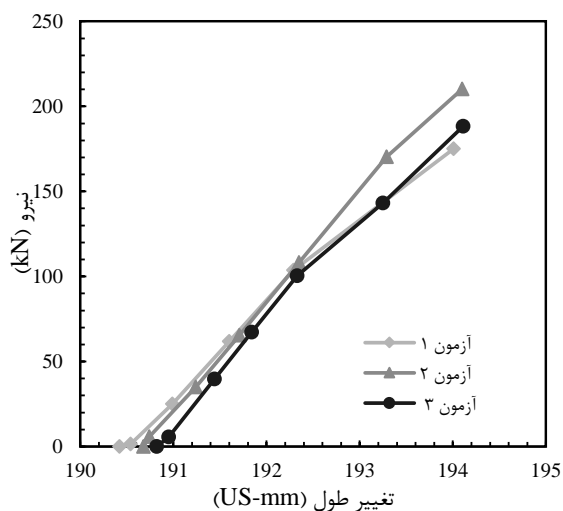
<sup>1</sup> Extensometer

۸؛ اما نیروی همبندی و ضریب اصطکاک تنها به تغییرات اصطکاک زیر گل پیچ وابسته نیست. در مرحله همبندی ۵ و ۶ مستقل از گشتاور اعمالی، پیچ‌ها با زاویه مشخصی بسته می‌شوند که این عمل سبب حفظ نیروی پیش‌بار پیچ در محدوده مجاز نیروی همبندی بستار می‌شود. زمانی که پیچ برای اولین بار همبندی می‌شود به خاطر ایجاد تنش لهدیگی اضافی در قسمت زیر گل پیچ، وجود سطوح زبر و همچنین نبود سطوح تکیه‌گاهی مناسب، نقطه تسلیم موضعی تشکیل می‌شود. همچنین نیروها نمی‌توانند به‌طور مساوی بر روی رزوه‌های اتصال توزیع شوند و به همین خاطر نیز ممکن است مقداری از گشتاور اعمالی صرف تغییر شکل دائمی در رزوه‌ها شود؛ بنابراین همان‌طور که در شکل ۷ نشان داده شده است، امکان کاهش نیروی همبندی تا ۱۰٪ مقدار بار اولیه در پیچ وجود دارد [۲۳]. عدم استفاده از پوشش نیز سبب افزایش اصطکاک و در نهایت کاهش نیروی همبندی می‌شود.



شکل ۸: تغییرات زبری سطح زیر گل پیچ

در شکل ۹ نمودار نیروی پیش‌بار و اندازه‌گیری تغییر طول پیچ با دستگاه فراصوت نشان داده شده است. تغییرات طولی پیچ‌ها تقریباً در محدوده یکسانی قرار داشتند که احتمالاً به دلیل عدم پراکندگی زیاد در نیروهای پیش‌بار اعمالی است. طول اولیه پیچ L<sub>0</sub> برابر ۱۹۰٫۴۲ میلی‌متر است. در آزمون سوم، نیروی پیش‌بار پیچ بدون پوشش به دلیل افزایش ضریب اصطکاک کاهش یافت که در نتیجه مقادیر تغییرات طولی پیچ نسبت به دو مرحله قبل کمتر شد.



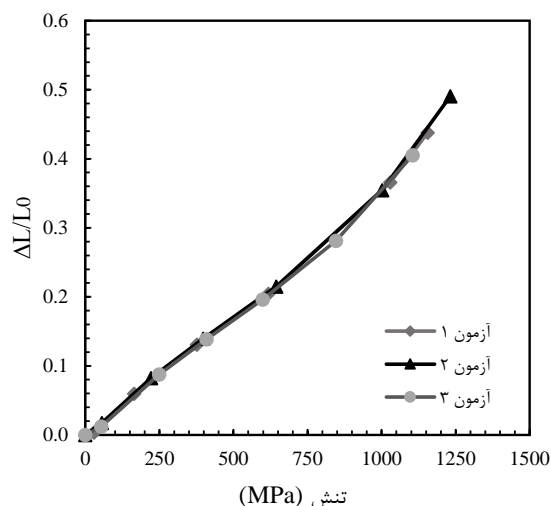
شکل ۹: تغییرات نیروی پیش‌بار نسبت به تغییرات طول فراصوت

جدول ۲: آزمون کشش پیچ بستار ۱،۵×۱۶ M

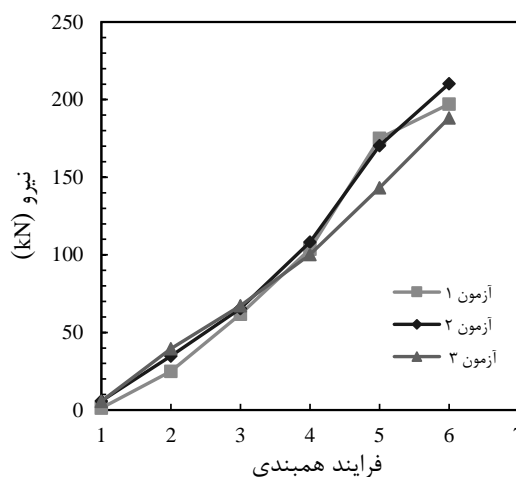
خواص مکانیکی	مقادیر	حد مجاز استاندارد طبقه ۱۲٫۹
استحکام فاصله ۰٫۲٪ (MPa)	۱۲۱۱	> ۱۱۰۰
استحکام نهایی (MPa)	۱۳۳۸	> ۱۲۲۰
ازدیاد طول نسبی (%)	۱۴	> ۸
کاهش سطح مقطع (%)	۵۸	> ۴۴

### ۳- نتایج

شکل ۶ نشان‌دهنده تغییرات کشسان پیچ در مراحل همبندی است که توسط لائی نیروسنج اندازه‌گیری و وابستگی پایدار بین کرنش و تنش مشاهده شد. در شکل ۷، اثر تعداد دفعات همبندی بر روی نیروی پیش‌بار و گشتاور مورد نیاز در مراحل مختلف نشان داده شده است.

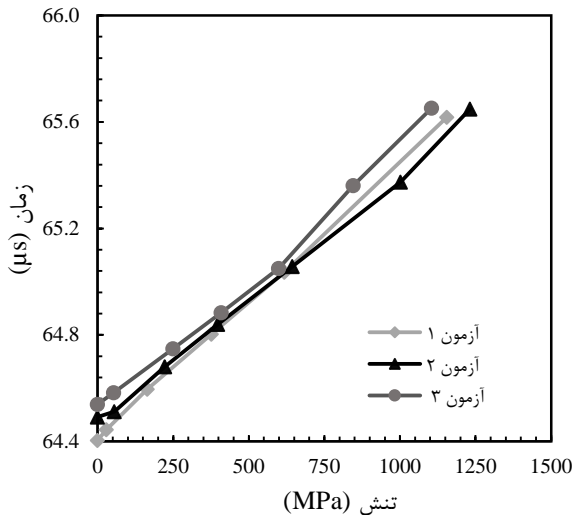


شکل ۶: تغییرات کرنش بر اساس تغییرات تنش در فرایند همبندی

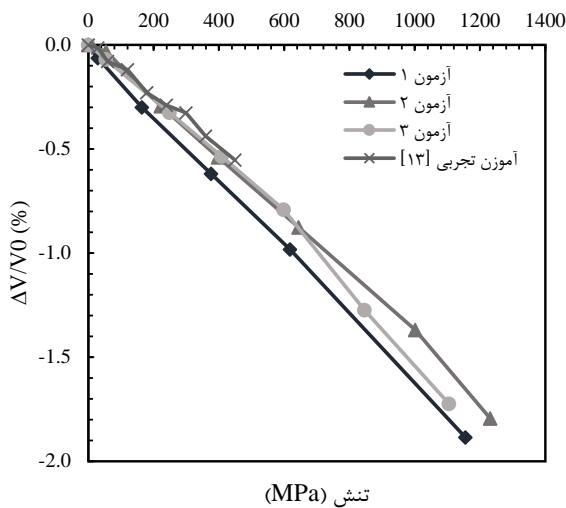


شکل ۷: تغییرات نیروی پیش‌بار بر حسب مراحل مختلف همبندی

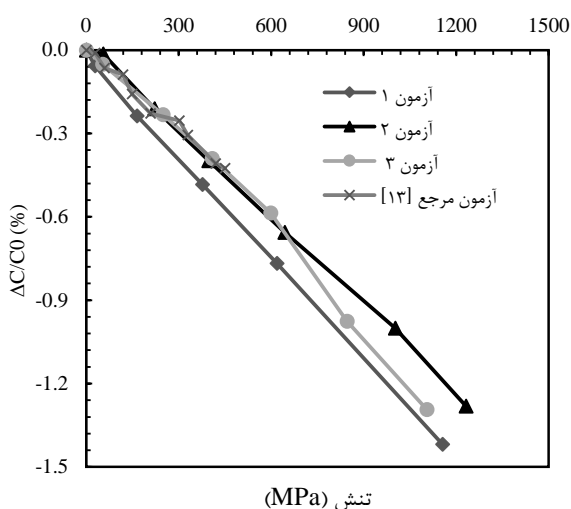
پس از هر بار همبندی سطح زیر گل پیچ ساییده و سبب برهم خوردن صافی سطح و افزایش ضریب اصطکاک در زیر گل پیچ می‌شود (شکل



شکل ۱۰: تغییرات زمان. فراسوت نسبت به تنش



شکل ۱۱: تغییرات سرعت ظاهری موج فراسوت نسبت به تنش



شکل ۱۲: نمودار تغییرات س.م.ف. نسبت به تنش

جدول ۳ تغییر طول پیچ اندازه‌گیری شده با فراسوت در انتهای فرایند همبندی را با تغییر طول واقعی پیچ بر اساس نیروی کشش مقایسه می‌کند.

همچنین تغییر طول دائمی<sup>۱</sup> پیچ پس از هر مرحله همبندی با کولیس اندازه‌گیری شد. همان‌طور که در جدول ۲ نشان داده شده است، استحکام جابه‌جائی ۰,۲٪ برای نمونه آزمون کشش، ۱۲۱۱ مگاپاسکال است. بیشینه تنش اعمالی محوری به پیچ در مراحل اول تا سوم بترتیب برابر ۱۱۱۵، ۱۲۳۱ و ۱۱۰۴ مگاپاسکال است.

با مقایسه شکل ۷ و جدول ۳ می‌توان دریافت که در آزمون اول نسبت به آزمون دوم گشتاور قوی‌تری اعمال شد اما تنش محوری در آزمون اول نسبت به آزمون دوم ضعیف‌تر و در بازه کمتر از تنش تسلیم است. این پدیده در حالی رخ می‌دهد که در جدول ۳ تغییر شکل دائمی در آزمون اول نسبت به آزمون دوم بیشتر است. دلیل مشاهده این پدیده وجود ضریب اصطکاک بزرگتر در مرحله نخست همبندی است که باعث اعمال تنش برشی بزرگتر در آزمون اول نسبت به آزمون دوم می‌شود. بنابراین مقدار بیشتری از گشتاور اعمالی صرف ایجاد تنش لهدگی گل پیچ و تغییر شکل دائمی در رزوه‌ها می‌شود که در نهایت نیروی پیش‌بار کمتری نسبت به آزمون دوم توسط پیچ اعمال شد. در آزمون دوم علاوه بر افزایش تنش اعمالی (بیشتر از استحکام تسلیم)، به دلیل شکل گرفتن مناسب و کارسخت شدن رزوه‌ها، مقادیر تغییر شکل دائمی و ضریب اصطکاک کاهش و نیروی محوری اعمالی توسط پیچ افزایش یافت. عدم وجود پوشش فسفات روی در آزمون سوم باعث افزایش ضریب اصطکاک شد؛ در نتیجه مقدار نیروی همبندی تا مقدار کمتر از نقطه تسلیم کم شد و تغییر طول همبندی و تغییر طول دائمی آن نیز کاهش یافت.

جدول ۳: تغییرات طول پیچ

آزمون	تغییر طول		
	دائمی (mm)	واقعی (mm)	فراسوت (us-mm)
۱	۰,۲۶	۰,۸۴	۳,۵۲
۲	۰,۱۴	۰,۹۳	۳,۴۲
۳	۰,۰۲	۰,۷۷	۳,۲۴

شکل‌های ۱۰ تا ۱۲ نتایج آزمون همبندی بترتیب بر اساس ز.ا.م. فراسوت، نرخ تغییرات سرعت ظاهری فراسوت و نرخ تغییرات سرعت فراسوت را بر حسب کرنش اعمالی نشان می‌دهد. تنش به صورت مرحله ای و بر اساس فرایند همبندی پیچ افزایش یافت.

در شکل ۱۰ با افزایش طول  $L_0$  پیچ به دلیل نیروهای کششی اعمالی، ز.ا.م. فراسوت افزایش می‌یابد. بر اساس شکل ۱۱ با افزایش تنش در پیچ‌ها، سرعت ظاهری موج فراسوت کاهش می‌یابد.

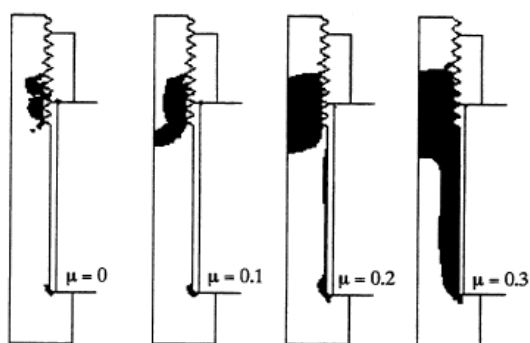
<sup>1</sup> Plastic deformation

شکل ۱۳ توزیع تغییر شکل دائمی در کشش خالص و در فرایند همبندی از مرجع [۱۱] را نشان داده است که توجیه کننده کاهش س.م.ف. در فرایند همبندی پیچ نسبت به کشش خالص به دلیل اعمال تنش برشی، تمرکز تنش بیشتر در رزوه‌های پیچ و تغییر شکل دائمی است. باید خاطر نشان کرد که گرچه مقداری تغییر شکل دائمی در رزوه‌های پیچ پس از همبندی ایجاد می‌شود اما بیشتر قسمت‌های پیچ و قطعات متصل شده در حالت کشسان باقی می‌مانند.

به همین دلیل پیش از هر مرحله همبندی، پیچ بدون تنش توسط دستگاه فراصوت و کولیس اندازه‌گیری و مقادیر آن‌ها با هم مقایسه شد. نتایج نشان دهنده صحت عملکرد دستگاه فراصوت بود.

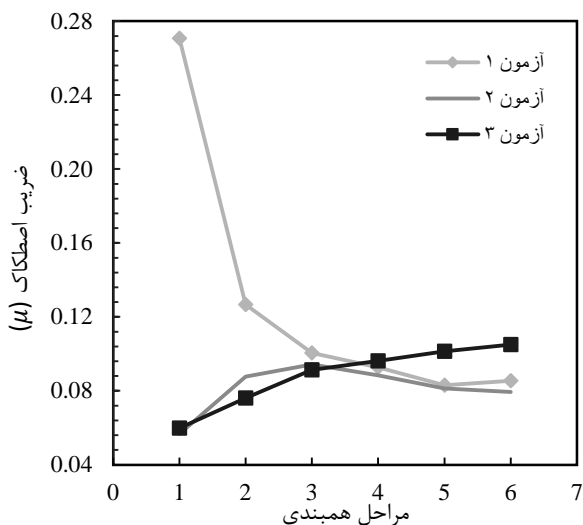
مرجع [۱۷] تغییرات س.م.ف. در تنش کششی خالص پیچ M16 طبقه ۱۰،۹ که از اثر فرایند همبندی چشم پوشی شده است را بررسی کرد. عامل مؤثر دیگر بر روی تنش، ضریب اصطکاک است که تعداد دفعات همبندی و پوشش پیچ بر روی این متغیر اثر می‌گذارد.

شکل ۱۴ نشان می‌دهد که ضریب اصطکاک اثر بیشتری بر تنش و گسترش ناحیه دائمی دارد، زیرا برای ایجاد نیروی همبندی مشخص با افزایش اصطکاک نیاز به گشتاورهای بزرگتری است.



شکل ۱۴: اثر ضریب اصطکاک بر گسترش ناحیه دائمی پیچ M12 [۱۱]

نمودار ضریب اصطکاک برای پیچ‌های بستار از مرجع [۲۵] در شکل ۱۵ نشان داده شده است.



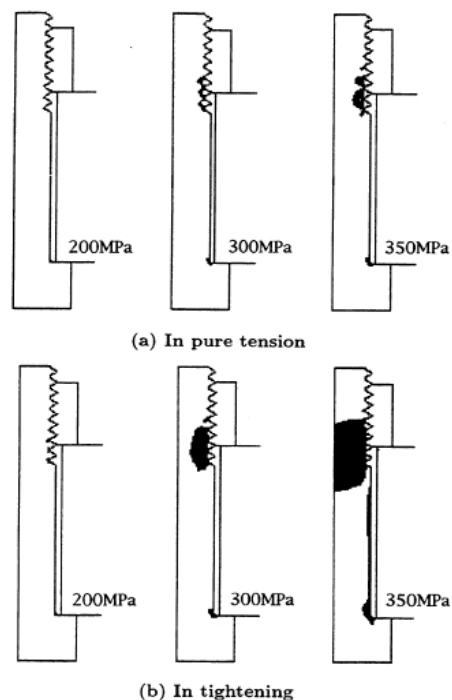
شکل ۱۵: ضریب اصطکاک-فرایند همبندی پیچ بلند بستار [۲۵]

نتایج حاصل از آزمون‌های انجام شده با نتایج حاصل از مرجع [۱۷] که در نیروهای کششی ضعیف‌تر، تنش محوری خالص و پیچ M16 طبقه ۱۰،۹ انجام گرفته، مقایسه شد.

همان‌طور که از معادله‌های ۶ و ۹ انتظار می‌رفت س.م.ف. به طور خطی به تنش و در ماده به چگالی و ضریب کشسان وابسته است. بر اساس نتایج به دست آمده از اعمال تنش و اندازه‌گیری تغییرات س.م.ف. به پیچ، ضریب کشسان و یا چگالی فولاد تغییر می‌کند که این تغییرات سبب تغییر سرعت انتشار موج می‌شود. تغییرات س.م.ف. در حالت انتشار موج طولی احتمالاً مستقل از تغییرات ضریب کشسان و وابسته به تغییرات چگالی است [۱۵، ۲۴].

اتصالات پیچ به دلیل شکل هندسی پیچیده در معرض تمرکز تنش‌های قوی در ریشه رزوه‌ها اند. نواحی تغییر شکل دائمی در اطراف ریشه رزوه‌ها حتی در نیروهای محوری نسبتاً کم نیز شکل می‌گیرد.

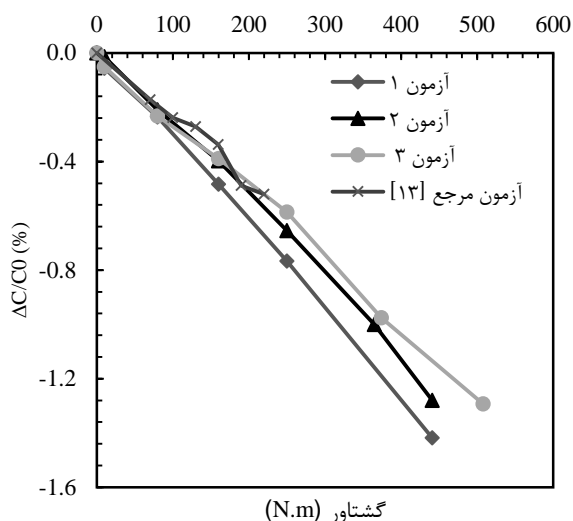
ناحیه مشکی رنگ در شکل ۱۳ نشان دهنده آن است که افزایش گشتاور بستن بر روی توزیع ناحیه تغییر شکل دائمی اثر شدیدی دارد. در ابتدا ناحیه دائمی در اطراف ریشه رزوه‌های اول در سطح جدایش مهره شکل می‌گیرد. با افزایش گشتاور، ناحیه دائمی از قسمت خارجی به سمت محور پیچ گسترش می‌یابد؛ بنابراین بررسی اثر تغییر شکل دائمی بسیار مهم است.



شکل ۱۳: گسترش ناحیه دائمی پیچ M12 (a) در کشش خالص (b) در فرایند همبندی [۱۱]

در فرایند بستن پیچ برای اعمال نیروی همبندی علاوه بر تنش کششی، تنش برشی نیز در پیچ شکل می‌گیرد. بسیاری از مطالعات قبلی روی تغییرات س.م.ف. به رفتار پیچ تنها در کشش خالص پرداخته‌اند که از اثر تنش برشی صرف‌نظر شده است.

برشی ناشی از همبندی بررسی شده است که نشان دهنده کاهش بیشتر تغییرات سرعت موج در مقایسه با آزمون کشش استاندارد مشاهده است.



شکل ۱۷: نمودار تغییرات س.م.ف. نسبت به گشتاور همبندی

بنابر این برای محاسبه تنش کششی و گشتاور پیچ  $M_{16 \times 1.5}$  طبقه ۱۲،۹ با طول بستن ۱۴۱ میلی‌متر با استفاده از زمان تأخیر موج فراصوت یا تغییر طول فراصوت می‌توان به صورت مستقیم از معادلات ۱۱ و ۱۲ استفاده نمود.

مقادیر تنش محاسبه شده از معادله ۱۲ با مرجع [۲۶] برای پیچ  $M_{10 \times 1.5}$  طبقه ۱۰،۹ با طول بستن ۹۰ میلی‌متر مقایسه و مقادیر تفاوت کمتر از ۱،۸٪ و مقادیر تفاوت در برآورد تنش نسبت به لائی نیروسنج در محدوده ۹٪ مشاهده شد. بر این اساس می‌توان با پذیرفتن مقداری خطا، تخمینی از تنش در پیچ‌های استحکام قوی با سایر ابعاد را هم به دست آورد.

$$\sigma(MPa) = 2.11 \times 10^5 \left( \frac{L_{ult} - L_0}{C_0} \right) + 15.12 \quad (11)$$

$$T(N.m) = 140.26 \times (L_{ult} - L_0) + 7.16 \quad (12)$$

#### ۴- نتیجه گیری

در این مطالعه فرایند همبندی با روش گشتاور-زاویه پیچ استحکام قوی بستار مطالعه شد. گشتاور همبندی در تمام مراحل آزمون ثبت شد. نیرو پیش‌بار توسط لائی نیروسنج اندازه‌گیری شد و تغییر طول پیچ از روش پژواک بر اساس تغییرات س.م.ف. و اندازه‌گیری ز.ا.م. به دست آمد.

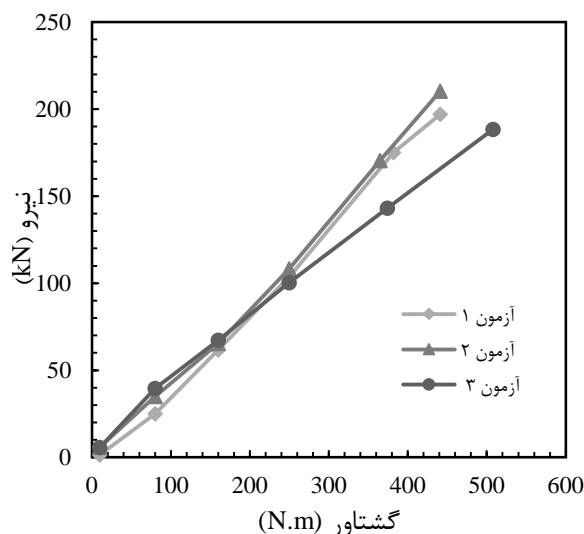
نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که این پیچ در تنش بسیار شدید تا ناحیه دائمی همبندی می‌شود. نیروی محوری قوی پیچ باعث تغییراتی در ضریب اصطکاک در مراحل مختلف همبندی می‌شود. نتایج حاکی از این است که در اولین مرحله همبندی پیچ نو، تغییر شکل جزئی و دائمی رزوه باعث افت جزئی در نیروی پیش‌بار می‌شود. در مراحل

در مرحله نخست شکل رزوه‌های پیچ کاملاً منطبق با رزوه‌های استوانه نیست و از طرفی صافی سطح زیر گل پیچ در حالت مناسب است؛ بنابراین در همبندی پیچ نو بیشترین سهم گشتاور نسبت به سایر مراحل صرف تغییر شکل رزوه‌ها و سطوح زیر و خشن می‌شود. این پدیده به وضوح در تغییرات س.م.ف. به دلیل افزایش تنش در رزوه‌ها نسبت به سایر مراحل در شکل ۱۲ قابل مشاهده است.

در مرحله بعدی رزوه‌ها شکل گرفته، گشتاور اعمالی صرف غلبه بر اصطکاک زیر گل پیچ می‌شود که باعث اعمال نیروی همبندی بیشتر با اعمال تنش برشی و گشتاور ضعیف‌تر می‌شود.

این حالت شرایط مناسب‌تری برای مقایسه با تغییرات س.م.ف. در کشش خالص مرجع [۱۷] است که با مقایسه نتایج می‌توان دریافت که تطابق خوبی 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. این افزایش ضریب اصطکاک به دلیل شکل‌گیری کامل رزوه‌ها تا نیروهای زیاد قابل مشاهده نیست که در نهایت اثر آن در مراحل ۵ و ۶ در شکل ۱۶ به خوبی بر روی تغییرات س.م.ف. قابل مشاهده است.



شکل ۱۶: تغییرات نیروی پیش‌بار نسبت به گشتاور

شکل ۱۷ نمودار تغییرات س.م.ف. را بر حسب گشتاور همبندی برای ۳ آزمون تا ناحیه دائمی را نشان می‌دهد. همان‌طور که از نظریه‌ها انتظار می‌رفت نتایج نشان می‌دهد با افزایش گشتاور، س.م.ف. کاهش می‌یابد و می‌تواند مبنای مناسبی برای تخمین س.م.ف. برای پیچ‌های استحکام قوی در کاربردهای تحقیقاتی و صنعتی باشد.

نتایج مرجع [۱۳] در آزمون کشش تک‌محور به دست آمده است. این در حالی است که در این مطالعه، هم تأثیر تنش محوری و هم تنش‌های

### زیرنویس‌ها

I	جهت محور X
J	جهت محور Y
K	جهت محور Z

### مراجع

- [1] T. Fukuoka and T. Takaki, Evaluations of the tightening process of bolted joint with elastic angle control method, ASME/JSME Pressure Vessels and Piping Conference, pp. 11-18, 2004.
- [2] T. Fukuoka and T. Takaki, Elastic plastic finite element analysis of bolted joint during tightening process, Journal of Mechanical Design, vol. 125, pp. 823-830, 2003.
- [3] H. Yamashita, T. Makimae, K. Yoshizu, and S. Nakatani, Development of plastic region tightening cylinder head bolts for new diesel engine, SAE Technical Paper 0148-7191, 1985.
- [4] 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, pp. 11-29, 2016.
- [5] 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, ed: Springer, pp. 1549-1557, 1987.
- [6] 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, pp. 253-259, 1986.
- [7] N. Kim and M. Hong, Measurement of axial stress using mode-converted ultrasound, NDT & E International, vol. 4, pp. 164-169, 2009.
- [8] 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.
- [9] 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, pp. 364-373, 2011.
- [10] 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, pp. 420-427, 2009.
- [11] F. Toshimichi and T. Tomohiro, Elasto-plastic analysis of bolted joint during tightening process,

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 پیش‌بار خواهد شد. در صورت استفاده از روش همبندی زاویه‌ای این اثر کاهش را می‌توان تا حد زیادی برطرف کرد. س.م.ف.، وابستگی نسبتاً خطی با وجود تنش در ساق پیچ دارد. این تنش‌ها هم تنش‌های محوری و هم تنش‌های برشی ناشی از فرایند همبندی به دلیل وجود اصطکاک هستند.

مقایسه نتایج این مطالعات و نتایج دیگر محققان نشان داد که تنش محوری عمده تأثیر را بر تغییرات س.م.ف. می‌گذارد ولی وجود تنش‌های برشی تا حدی می‌تواند باعث کاهش بیشتر س.م.ف. هم شود. در نهایت معادله تغییرات موج فراصوت بر حسب تنش اعمالی در فرایند همبندی واقعی به دست آمد که با استفاده از این معادله می‌توان در فرایندهای مختلف تحقیقاتی و کاربردی، تخمین قابل قبولی از تغییر طول واقعی پیچ با استفاده از روش فراصوت به دست آورد. بر اساس این معادله، نیروی پیش‌بار در مطالعات مشابه با کمتر از ۱۰٪ تفاوت تخمین زده شد.

### تشکر و قدردانی

نویسندگان این مقاله، مراتب تشکر و قدردانی خود را از شرکت توسعه‌ی قوای محرکه دینا و تحقیقات موتور ایران خودرو به دلیل حمایت این تحقیق اعلام می‌دارند.

### فهرست علائم

A	دامنه موج، m
E	ضریب کشسان، GPa
f	ثابت کشسان غیرخطی، $m^2/N$
g	ثابت‌های کشسان غیرخطی، $m^4/N$
C	س.م.ف.، m/s
V	سرعت ظاهری موج فراصوت، m/s
L	طول، mm
T	زمان، us
k	تعداد موج

### علائم یونانی

$\varepsilon$	کرنش
$\rho$	چگالی، $kg/m^3$
$\sigma$	تنش، MPa
$\varepsilon$	کرنش
$\omega$	بسامد، Hz

- [19] A. Baghalian, S. Tashakori, V.Y. Senyurek, M. Unal, and I.N. Tansel, Novel Approaches for Loose Bolt Detection With and Without Sensors using Heterodyning Effect, *Structural Health Monitoring*, 2017.
- [20] R. Misra, Determine the Fatigue behavior of engine damper caps screw bolt, *International Journal of Computational Engineering Research*, vol. 2, pp. 981-990, 2012.
- [21] A. Piccato, G. Belingardi, A. Nassar Sayed, and W. Zhijun, Multi-Axial Fatigue of sheet metal joints under clamp load and cycle bending, 2017.
- [22] J.K. Na, J.H. Cantrell, and W.T. Yost, Linear and nonlinear ultrasonic properties of fatigued 410CB stainless steel, in *Review of progress in quantitative nondestructive evaluation*, ed: Springer, pp. 1347-1352, 1996.
- [23] W. Chapman, *Modern Machine Shops Guide to Threads, Threading, and Threaded Fasteners*: Hanser Gardner Publications 2004.
- [24] S.A. Nassar and A.B. Veeram, Ultrasonic control of fastener tightening using varying wave speed, *Journal of pressure vessel technology*, vol. 128, pp. 427-432, 2006.
- [25] S. Moradi and S.V. Hosseini, Investigation Effect of Used Bolt on Friction Coefficient and Assembly Force of Cylinder Head Bolt in Marine Diesel Engine, *International Conference on Applied Research in Electrical, Mechanical & Mechatronics Engineering*, vol. 2, 2017 (In Persian).
- [26] G. Hartmann, Potentials and Limitations of Ultrasonic Clamp load Testing, *SAE Technical Paper* 0148-7191, 2007.
- ASME, *Design Engineering Division*, vol. 105, pp. 151-156, 1999.
- [12] 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, pp. 185-191, 1998.
- [13] H. Yasui, H. Tanaka, I. Fujii, and K. Kawashima, Ultrasonic measurement of axial stress in short bolts with consideration of nonlinear deformation, *JSME International Journal Series A Solid Mechanics and Material Engineering*, vol. 42, pp. 111-118, 1999.
- [14] 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 elastic modulus by using ultrasonic wave, *JSME International Journal Series A*, vol. 44, pp. 383, 2001.
- [15] R. Bergman and R. Shahbender, Effect of statically applied stresses on the velocity of propagation of ultrasonic waves, *Journal of Applied Physics*, vol. 29, pp. 1736-1738, 1958.
- [16] 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, pp. 1941-1946, 2009.
- [17] K.Y. Jhang, H.H. Quan, J. Ha, N.Y. Kim, Estimation of clamping force in high-tension bolts through ultrasonic velocity measurement, *Ultrasonics*, vol. 44, pp. e1339-e1342, 2006.
- [18] L. Huo, F. Wang, H. Li, and G. Song, A fractal contact theory based model for bolted connection looseness monitoring using piezoceramic transducers, *Smart Materials and Structures*, vol. 26, p. 104010, 2017.



## Investigation the effect of clamping stress on ultrasonic velocity in cylinder head bolt of diesel engine

S. Moradi K.<sup>1</sup>, S. V. Hosseini <sup>2\*</sup><sup>1</sup>Department of Mechanical Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran, [Sh.moradi@shahroodut.ac.ir](mailto:Sh.moradi@shahroodut.ac.ir)<sup>2</sup>Department of Mechanical Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran, [V\\_hosseini@shahroodut.ac.ir](mailto:V_hosseini@shahroodut.ac.ir)

\*Corresponding Author

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received: 29 June 2017

Accepted: 17 April 2018

#### Keywords:

High-tension bolts

Ultrasonic method

Velocity of wave

Clamping force

Cylinder head

Diesel engine

### ABSTRACT

Clamp load is the most important characteristics of a bolted joint that should be estimated with precise method. This paper investigates the effect of clamping stress on ultrasonic velocity in cylinder head bolt of diesel engine using pulse-echo method. So in assembly process, clamping force, fastening torque and ultrasonic result are measured simultaneously. To investigate effect of new and used bolt and also effect of thread coating, various conditions are tested. Results showed that at first stage of assembly, minor plastic deformation in bolt thread can decrease clamping force. In addition in used bolt the plastic deformation of thread is not significant, but increasing of friction coefficient role play in clamping force. Although using zinc phosphate can decrease of friction coefficient and increase preload, but also using torque-angle procedure can control effect of this term. Effect of bolt assembly stress on ultrasonic velocity is approximately linear elastic depending on clamping force and friction coefficient. Finally relation of ultrasonic velocity and bolt stresses in a real assembly process is derived in whole elastic region of high tension bolt that can estimate clamping force in various size bolts with less than 10% error.

