بهبود رفتار اتصال شمع به غلاف فولادی توسط مصالح مرکب پایه سیمانی مسلح به الیاف

مجید بریدرضایی[۱] ، فرشید جندقی علائی[۲*]

[۱] دانشجوی دکتری مهندسی عمران-گرایش سازه، دانشگاه صنعتی شاهرود، mbaridrezaee@shahroodut.ac.ir
[۲] دانشیار گروه مهندسی عمران ، دانشگاه صنعتی شاهرود ، farshidja@yahoo.com

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:
تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۰۷/۱۰
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۱۰/۰۳
تاریخ انتشار مقاله: ۱۴۰۳/۱۰/۰۳

کلمات کلیدی:
اتصال شمع به غلاف فولادی
گروت
بتن الیافی
کلید برشی

چکیده

در دهه‌های اخیر اتصال بتنی شمع به غلاف فولادی از محبوبیت ویژه‌ای برخوردار شده است. بررسی‌ها نشان داده که مود شکست بتن در این اتصال به صورت شکست برشی است. با توجه به مودهای شکست اتصال، پیش بینی می‌شود که با بهبود عملکرد بتن، مقاومت نهایی و شکل پذیری اتصال نیز بهبود یابد. در این تحقیق عملکرد بتن به کمک استفاده از الیاف فولادی بهبود یافته است. برای این امر از ۱/۵ درصد الیاف فولادی ساده در بتن استفاده شده است تا مقاومت خمشی و مقاومت فشاری آن بهبود یابد. نتایج نشان داد که استفاده از ۱/۵ درصد الیاف باعث بهبود مقاومت نهایی اتصال تا ۲۲ درصد و همچنین بهبود شکل پذیری آن شده است. همچنین نتایج آزمایش با آیین نامه های DNV[۱]؛ API[۲] و HSE[۳] بررسی شد که بین این سه آیین نامه، DNV بیشترین همخوانی را با نتایج آزمایش نشان داد.

Improving the behavior of pile to sleeve connections by fiber reinforced cement based composite materials

Majid Barid Rezaee[1], Farshid Jandaghi Alaee[2]

[1] PHD. Student, Civil. Eng., Shahrood Univ. of Technology, mbaridrezaee@shahroodut.ac.ir
[2] Assoc. Prof., Civil. Eng., Shahrood Univ. of Technology, farshidja@yahoo.com

ARTICLE INFO

Article History:
Received: 01 Oct 2024
Accepted: 23 Dec 2024
Available online: 23 Dec 2024

Keywords:
Pile to sleeve connection
Groute
Fiber reinforced concrete
Shear key

ABSTRACT

In recent decades, the pile-to-sleeve grouted connections has gained significant popularity. Studies have shown that the failure mode of concrete in this connection is shear failure. Considering the failure modes of the connection, it is predicted that improving the performance of the concrete will also enhance the ultimate strength and ductility of the connection. In this research, the performance of the concrete was improved using steel fibers. For this purpose, 1.5% of straight steel fibers have been used in concrete to improve flexural strength and compressive strength. The results demonstrated that the use of 1.5% steel fibers improved the ultimate strength of the connection by up to 22% and also enhanced its ductility. Furthermore, the experimental results were compared with the DNV, API, and HSE standards, with the DNV standard showing the highest consistency with the experimental results.

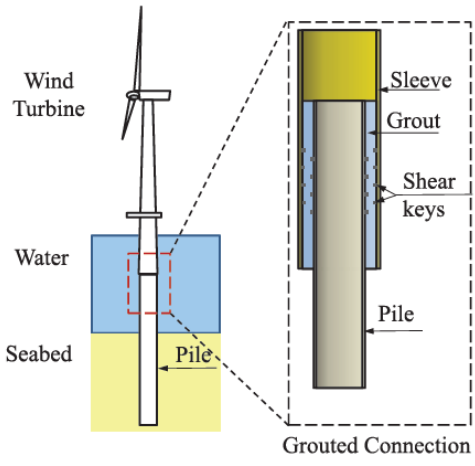
۱ - مقدمه

تکنیک اتصال بتنی شمع به غلاف فولادی ابتدا در صنایع نفتی مورد استفاده قرار گرفت و سپس در دهه ۱۹۹۰ به سازه‌های توربین‌های بادی فرا ساحلی گسترش یافت. پیش از سال ۱۹۸۰، اکثر سازه‌های دریایی از لوله‌های فولادی جوش شده به فونداسیون‌های شمعی تشکیل می‌شدند. با این حال، این اتصالات با مشکلات متعددی مواجه بودند، از جمله اجرای پیچیده‌تر در اعماق بیشتر، آسیب پذیری در برابر بارهای ناشی از نصب و جابه‌جایی قطعات بزرگ فولادی، نیاز به عملیات حرارتی پس از جوشکاری و هزینه‌های بالاتر نصب.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-25]
[DOI: 10.61186/marineeng.20.44.6]

به منظور رفع این مشکلات، روش جدیدی توسعه یافت که با حذف فرآیند جوشکاری، ارتباط بین شمع و غلاف فولادی از طریق بتن و درگیری آن با کلیدهای برشی تعبیه شده بر روی شمع و غلاف انجام می‌شد. این روش بسیاری از ضعف‌های اتصال‌های جوشکاری شده را برطرف کرد [۱]. در سال‌های اخیر، اتصال بتنی شمع به غلاف فولادی به طور فزاینده‌ای محبوب شده است. این اتصال عمدتاً در صنایع انرژی بادی فرا ساحلی و همچنین در ساخت اسکله‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. اخیراً، این نوع اتصال در اسکله‌های جنوب و شمال کشور نیز به کار رفته است که اهمیت بررسی و تحقیق بیشتر در این زمینه را دوچندان می‌کند.

همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده است، این اتصال شامل شمع و غلاف فلزی، بتن و کلیدهای برشی تعبیه شده بر روی شمع و غلاف می‌باشد. انتقال بار در این سیستم به این صورت است که بار از غلاف فولادی توسط کلیدهای برشی به بتن منتقل شده و سپس از بتن، از طریق کلیدهای برشی مقابل، به شمع منتقل می‌شود. بتن یا گروتی که در این نوع اتصال استفاده می‌شود، عموماً مقاومت فشاری خوبی دارد، اما مقاومت کششی آن چندان بالا نیست. بررسی‌ها نشان داده‌اند که شکست بتن در این اتصال معمولاً به صورت شکست برشی اتفاق می‌افتد.



شکل ۱ - یک نمونه اتصال بتنی شمع به غلاف [۲]

با توجه به مودهای شکست در این اتصال، انتظار می‌رود که با بهبود عملکرد بتن، مقاومت نهایی و شکل پذیری اتصال نیز افزایش یابد. یکی از راهکارهای مؤثر برای بهبود عملکرد بتن در این اتصال، استفاده از الیاف در ترکیب بتن است. با این حال، تحقیقات محدودی در زمینه استفاده از بتن الیافی در این نوع اتصال انجام شده است و مطالعات موجود نیز پیشنهاد داده‌اند که بررسی‌های بیشتری در این زمینه صورت گیرد [۳-۵]. پیش بینی می‌شود که با استفاده از بتن‌های الیافی مناسب برای این نوع اتصال، بتوان بهبود چشمگیری در مقاومت و شکل پذیری اتصال ایجاد کرد.

لی و همکاران در تحقیقات خود بر روی رفتار برشی سطحی اتصال شمع به غلاف با بتن با مقاومت بالا، دو نوع بارگذاری محوری و بارگذاری خارج از محور را بررسی کردند [۶]. نتایج تحقیقات آن‌ها به شرح زیر خلاصه می‌شود:

۱. مقاومت اتصالات: مقاومت اتصالات شامل مقاومت اولیه و نهایی است. مقاومت اولیه عمدتاً تحت تأثیر ترک خوردگی مورب بتن قرار دارد، در حالی که مقاومت نهایی به ضریب اصطکاک و مقاومت لوله‌های فولادی وابسته است. نقاط قوت اولیه و نهایی به فاصله کلید برشی بستگی دارند.
۲. بارگذاری خارج از مرکز: این نوع بارگذاری تأثیر زیادی بر کاهش مقاومت نهایی اتصالات بتن ندارد، زیرا در این حالت محصور شدگی وجود دارد و همچنین مقاومت تحت تأثیر مقاومت لوله‌های فولادی است.
۳. ترک خوردگی و لغزش: ترک خوردگی مورب و لغزش به همراه خرد شدن بتن در نزدیکی کلیدهای برشی به طور هم زمان مشاهده شد. زاویه ترک مورب بتن در محدوده ۲۵ تا ۶۵ درجه متغیر بود و مشخص شد که با افزایش فاصله کلید برشی، زاویه ترک افزایش می‌یابد.

دای و همکاران به بررسی اتصال غلاف بتنی برای اتصال ستون‌های مربعی توخالی پرداختند [۷]. آن‌ها دریافتند که با در نظر گرفتن تعداد و شرایط یکسان در کلید برشی، ضخامت بتن تأثیر زیادی بر مقاومت متوسط برشی ندارد. افزایش مقاومت محوری نمونه با ضخامت بتن ۱۸ میلی‌متر در مقایسه با ضخامت ۲۸ میلی‌متری عمدتاً به دلیل سطح تماس بیشتر بود. همچنین، با افزایش تعداد کلید برشی و کاهش فاصله آن‌ها، نسبت شکل پذیری اتصال کاهش می‌یابد.

ابوبکر در سال ۲۰۲۰ تحقیقی در مورد تخمین مقاومت نهایی اتصال با بتن‌های NC[۴]، HPC[۵] و UHPC[۶] انجام داد [۵]. او آزمایش‌ها را بر روی دو سری نمونه با ضخامت‌های مختلف بتن (۲۰ و ۳۰ میلی-متر) انجام داد. نتایج نشان داد که اضافه کردن الیاف تغییر چندانی در سختی اولیه اتصال ندارد. در ضخامت اتصال ۲۰ میلی‌متر، اضافه کردن نسبت الیاف از ۱٪ به ۲٪ تأثیر کمی بر مقاومت اتصال داشت، اما در ضخامت اتصال ۳۰ میلی‌متر، افزایش نسبت الیاف از ۱٪ به ۲٪ تغییر قابل توجهی در مقاومت اتصال ایجاد کرد. همچنین، او دریافت که ظرفیت نهایی اتصال تنها به مقاومت فشاری بتن وابسته نیست، بلکه پارامترهای دیگر بتن مانند مقاومت خمشی و کششی و به طور کلی رفتار بتن تحت کشش و فشار نیز مؤثر است [۵].

آزمایشات انجام شده توسط اندرس و لوهاس [۳] نشان داد که می‌توان با استفاده از بتن با کارایی بالا، ظرفیت تحمل اتصالات بتن را به‌طور قابل توجهی افزایش داد. آن‌ها همچنین نشان دادند که مقاومت و ترکیب بتن را می‌توان با توجه به ظرفیت تحمل بار و

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-25]

[DOI: 10.61186/marineeng.20.44.6]

شکل پذیری اتصال بهینه کرد. آن‌ها موفق شدند با اضافه کردن دو درصد الیاف فولادی، مقاومت نهایی اتصال را ۲۵ درصد بهبود دهند. ژانگ و همکاران نیز در سال ۲۰۲۱ تحقیقاتی آزمایشگاهی بر روی اتصال بتنی میلگرد به غلاف فولادی با استفاده از بتن الیافی انجام دادند [۴]. پارامترهای متغیر آن‌ها شامل جنس الیاف، نسبت حجمی و طول الیاف بود. آن‌ها از الیاف PVA[۷]، BF[۸] و PP[۹] استفاده کردند و دریافتند که اضافه کردن الیاف باعث بهبود عملکرد اتصال از ۴۴ تا ۶۶ درصد می‌شود. همچنین، در مقایسه بین این سه نوع الیاف، الیاف بازالت بهترین عملکرد را نشان دادند. شکل ۲ نمونه آزمایش‌های انجام شده توسط ژانگ و همکاران را نمایش می‌دهد. همانطور که در شکل مشخص است آن‌ها روی اتصال میلگرد تمرکز کرده‌اند که با اتصال لوله کمی متفاوت است.

با توجه به تحقیقات گذشته، استفاده از الیاف در بتن باعث بهبود عملکرد اتصال بتنی شمع به غلاف می‌شود. این موضوع در سال‌های اخیر توجه بسیاری از محققان را جلب کرده و هنوز نیازمند بررسی و تحقیق بیشتر است [۳-۵]. همچنین، در تمام آیین نامه‌ها و استانداردهای موجود، بتن معمولی مورد بررسی قرار گرفته و نیاز است که این اتصال با بتن الیافی نیز مورد توجه ویژه قرار گیرد.

از آنجا که این نوع اتصال هنوز در کشور به طور محدود در اسکله‌های جنوب مورد استفاده قرار گرفته است و همچنین ضعف‌هایی که در مقالات مختلف به آن‌ها اشاره شده است، نیاز به انجام تحقیقات بیشتر در این زمینه احساس می‌شود. بررسی‌ها نشان می‌دهد یکی از نقاط ضعف این سیستم، مقاومت کششی پایین بتن در اتصال است که منجر به کاهش مقاومت برشی و کاهش مقاومت در برابر ترک می‌شود [۵]. بنابراین، با توجه به دانش موجود در زمینه بتن‌های الیافی، انتظار می‌رود که با استفاده از یک بتن الیافی مناسب، این ضعف برطرف شده و رفتار اتصال به طور قابل توجهی بهبود یابد. در این تحقیق با توجه به مصالح موجود در ایران بتنی خود تراکم با عملکرد بهبود یافته تولید شده است که دارای مقاومت فشاری و کششی بالا و همچنین شکل پذیری مناسب است تا با استفاده از آن، رفتار این نوع اتصال که در اسکله‌های جنوب کشور نیز استفاده می‌شود را بهبود بخشد.



شکل ۲ - نمونه آزمایش انجام شده بر روی اتصال میلگرد به غلاف فولادی توسط بتن [۴]

۲ - بررسی آزمایشگاهی

با توجه به اینکه بتن مورد بررسی در این تحقیق باید ویژگی‌هایی مانند خود تراکمی، انقباض کم، مقاومت کششی و فشاری بالا و شکل پذیری مناسب داشته باشد، طرح‌های اختلاط متعددی مورد ارزیابی قرار گرفتند و در نهایت، طرح اختلاط ارائه شده در جدول ۱ برای ساخت نمونه‌ها استفاده شد. الیاف فولادی برای دستیابی به مقاومت کششی بالا باید دارای مقاومت بیش از ۲۱۰۰ مگاپاسکال باشند [۸]. برای بررسی اثر الیاف بر رفتار اتصال، از الیاف ساده با طول ۱۶ میلی‌متر و نسبت طول به قطر ۶۴ استفاده شد. مشخصات کامل الیاف مطابق کاتالوگ محصول در جدول ۲ نشان داده شده است.

به منظور افزایش تراکم سیمان، از اجزای زیر استفاده شد:

۱. استفاده از سیمان به منظور هیدراتاسیون.

۲. استفاده از مواد پوزولانی فعال، ترجیحاً میکروسیلیس با قطری ۵ تا ۲۰ برابر کمتر از سیمان.

۳. استفاده از فیلر مانند پودر شیشه؛ البته برخی تحقیقات نشان داده‌اند که پودر شیشه در شرایط عمل آوری با حرارت، امکان واکنش با سیمان را دارد [۹].

۴. استفاده از ماسه ریز به عنوان سنگدانه

جدول ۱ - طرح اختلاط بتن

نوع مصالح	درصد وزنی نسبت به سیمان	
	بتن الیافی	بتن بدون الیاف
سیمان	۱	۱
میکرو سیلیس	۰/۲۵	۰/۲۵
پودر شیشه	۰/۲۵	۰/۲۵
آب	۰/۳۵	۰/۳۵
فوق روان کننده	۰/۰۲	۰/۰۲
ماسه A (بیشترین اندازه دانه ۰/۲ میلی‌متر)	۰/۲۷	۰/۲۸
ماسه B (بیشترین اندازه دانه ۰/۸ میلی‌متر)	۱/۰۵	۱/۱
الیاف	۰/۱۳۵	۰
درصد الیاف (V_f)	۱/۵	۰

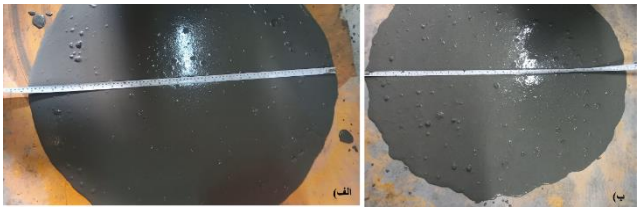
جدول ۲- مشخصات الیاف استفاده شده

مقاومت کششی (MPa)	۲۷۲۰
مدول الاستسیته (GPa)	۲۱۰
سطح مقطع	دایره
طول (mm)	۱۶
قطر (mm)	۰/۲۵
شکل الیاف	

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-25]

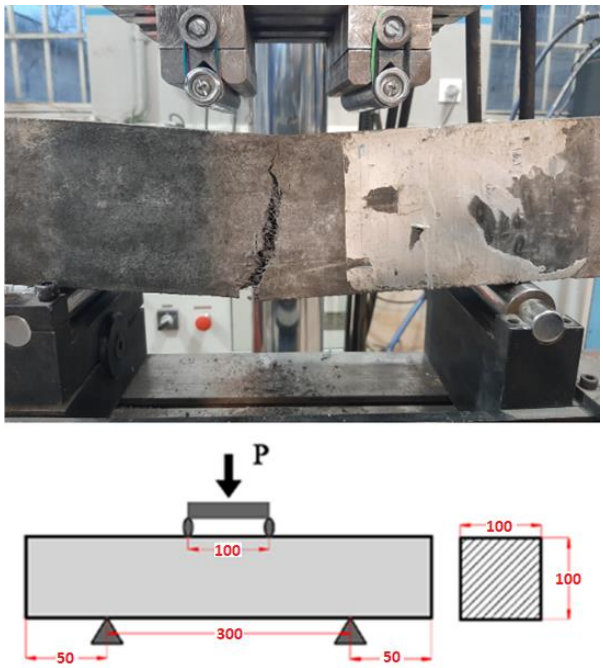
[DOI: 10.61186/marineeng.20.44.6]

در شکل ۳، آزمایش اسلامپ برای نمونه‌های با الیاف و بدون الیاف مشاهده می‌شود. جریان اسلامپ برای نمونه بدون الیاف ۸۵۰ میلی متر و زمان رسیدن به قطر ۵۰ سانتی‌متر ۲ ثانیه، و برای نمونه با الیاف جریان اسلامپ ۸۳۰ میلی‌متر و زمان رسیدن به قطر ۵۰ سانتی‌متر حدود ۳/۵ ثانیه اندازه‌گیری شد. با توجه به اسلامپ موجود می‌توان نتیجه گرفت که بتن خود تراکم است و به راحتی بین شمع و غلاف را پر می‌کند.



شکل ۳ - اسلامپ بتن الف) نمونه بدون الیاف ب) نمونه با الیاف

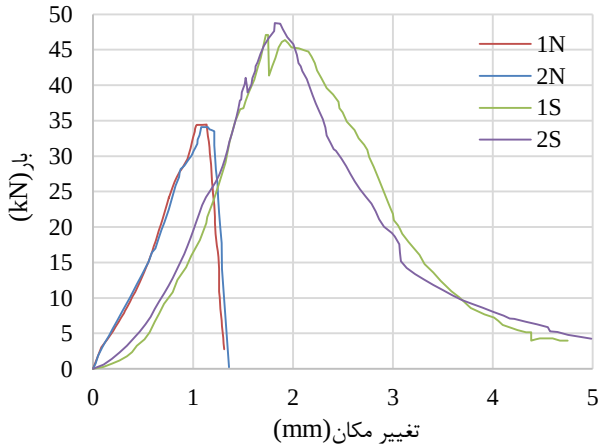
آزمایش مقاومت فشاری بر روی نمونه‌های مکعبی (سه نمونه برای هر آزمایش) مطابق با استاندارد ASTM-C39 و آزمایش مقاومت خمشی با استفاده از خمش چهار نقطه‌ای (دو نمونه برای هر آزمایش) بر اساس استاندارد ASTM-C78 انجام گرفت. در شکل ۴ شرایط نمونه بتن الیافی تحت بار خمش چهار نقطه‌ای و نحوه آزمایش نشان داده شده است. همچنین میانگین نتایج به دست آمده از این آزمایش‌ها در جدول ۳ نمایش داده شده است. در این جدول نمونه‌های بتن الیافی تحت آزمایش خمش به ترتیب با 1S و 2S و نمونه های بتن ساده با 1N و 2N نشان داده شده‌اند. در شکل ۵ نمودار بار تغییر مکان نمونه‌های خمشی نشان داده شده است. مشخص است که اضافه کردن الیاف باعث بهبود مقاومت نهایی و افزایش شکل پذیری بتن می‌شود. برای نمونه 1S مشاهده می‌شود که در نقطه بار حداکثر نمودار دچار افت ناگهانی ناشی از شروع ترک‌های اولیه در بتن می‌شود. به دنبال تشکیل این ترک‌ها، الیاف فعال می‌شوند و با مقاومت در برابر تنش‌های وارده، به ظرفیت باربری مقطع کمک می‌کنند.



شکل ۴ - آزمایش خمش ۴ نقطه‌ای

جدول ۳ – نتایج آزمایش مقاومت خمشی و فشاری بتن

نام نمونه		حداکثر بار خمشی (kN)	مقاومت خمشی (MPa)	میانگین مقاومت فشاری (MPa)
بتن بدون الیاف	1N	۳۴/۴۷	۱۰/۵۸	۷۴/۸۶
	2N	۳۴/۱۰	۱۰/۲۵	
بتن الیافی	1S	۴۸/۷۷	۱۵/۰۳	۹۷/۴۸
	2S	۴۷/۱۱	۱۴/۱۳	



شکل ۵ – نمودار بار تغییر مکان خمشی بتن الیافی و بتن بدون الیاف

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-25]

[DOI: 10.61186/marineeng.20.44.6]

ابعاد و مشخصات لوله‌های استفاده شده و کلیدهای برشی روی آن‌ها در جدول ۴ ارائه شده‌اند. این ابعاد به گونه ای انتخاب شده‌اند که با محدودیت‌های ابعادی اشاره شده در آیین نامه DNV همخوانی داشته باشند [۱۰]. همچنین در شکل ۶ شماتیک اتصال و پارامترهای به کار برده شده در جدول ۴ نشان داده شده‌اند.

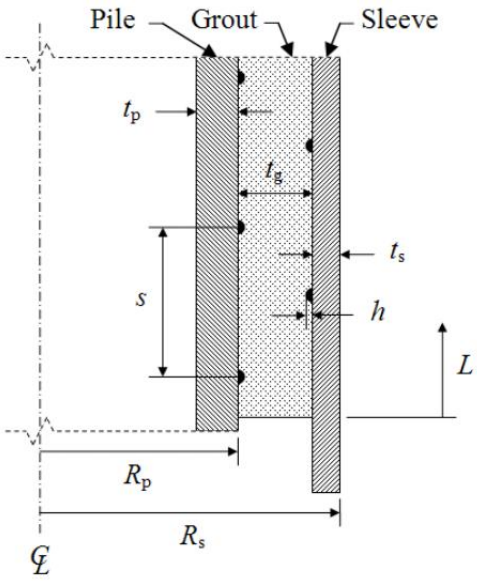
برای درک بهتر جزئیات اتصال، مقطع نمونه به همراه اندازه گذاری کامل آن در شکل ۷ نمایش داده شده است.

یکی از چالش‌های اصلی در ساخت نمونه‌ها، ایجاد کلیدهای برشی بر روی شمع و در داخل غلاف بود. بسیاری از محققان با جوش‌دادن میلگرد به سطح لوله یا تنها با جوش‌کاری کلیدهای برشی را ایجاد کرده‌اند. در این تحقیق نیز از روش مشابهی که در شکل ۸ نشان داده شده است، استفاده شده است [۱،۶،۷،۱۱].

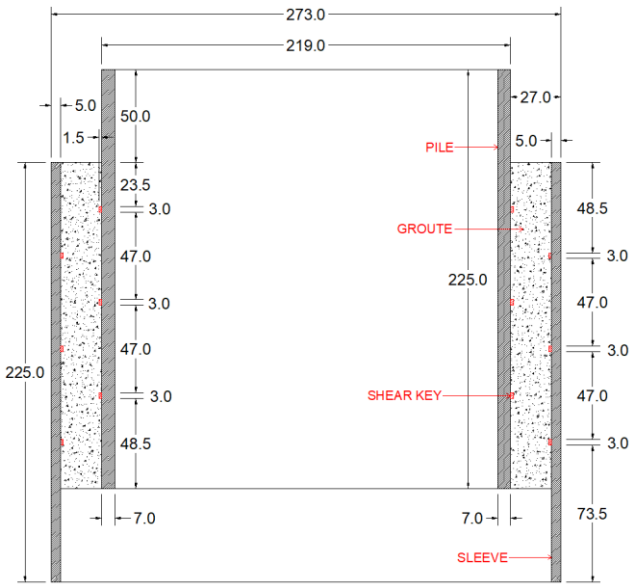
در چیدمان کلیدهای برشی، باید توجه داشت که پایین‌ترین کلید برشی غلاف باید از پایین‌ترین کلید برشی شمع پایین‌تر باشد. در غیر این صورت، ترک از کلید برشی پایینی غلاف تا دومین کلید برشی پایینی شمع امتداد خواهد یافت، که منجر به حذف یک کلید برشی مؤثر در اتصال می‌شود. ترتیب قرارگیری کلیدهای برشی به صورت یک در میان و با فاصله‌های مساوی، همان‌طور که توسط موسسه نفت آمریکا (API) و وزارت انرژی انگلستان توصیه شده، به کار رفته است [۱۲].

جدول ۴ - مشخصات لوله‌های تحت آزمایش

غلاف (mm)			شمع (mm)			بتن (mm)		کلید برشی (mm)		
D_s	t_s	L_s	D_p	t_p	L_p	L_g	t_g	h	s	w
۲۷۳	۵	۲۲۵	۲۱۹	۷	۲۲۵	۱۷۵	۲۲	۱/۵	۵۰	۳



شکل ۶ - شماتیک اتصال [10]



شکل ۷ - مقطع نمونه های مورد آزمایش (mm)



شکل ۸ - کلید برشی ایجاد شده بر روی نمونه به کمک جوشکاری

برای اطمینان از هم مرکز بودن لوله‌های فولادی و آماده سازی نمونه‌ها برای بتن ریزی، لوله‌ها با استفاده از یونولیت ثابت شدند. بارگذاری به صورت کنترل شده با جابجایی و سرعت ثابت یک میلی متر بر دقیقه انجام گرفت.

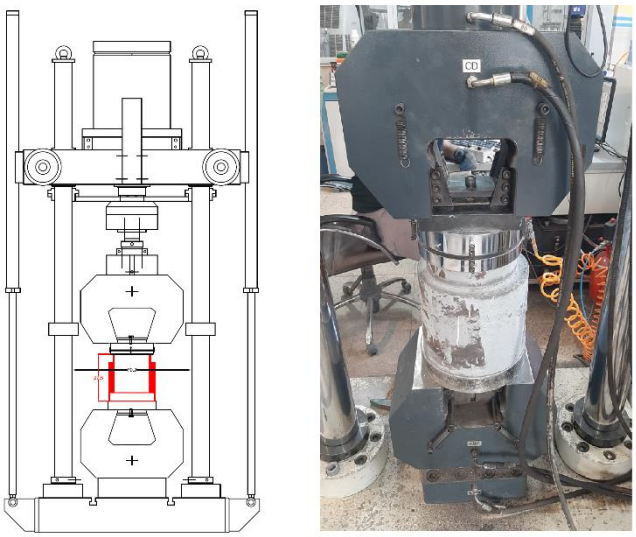
در شکل ۹ جزئیات نمونه‌ها تحت بارگذاری نمایش داده شده است. برای جلوگیری از تمرکز تنش ناشی از احتمال تراز نبودن لوله‌ها، بارگذاری به کمک فک فشاری فنری انجام شد تا بار به طور یکنواخت بر روی تمام سطح شمع وارد شود.

برای آزمایش اصلی، یک نمونه اتصال با بتن بدون الیاف و دو نمونه اتصال با بتن الیافی تحت آزمایش فشار محوری قرار گرفتند. نمودار بار-تغییر مکان دو نوع اتصال در شکل ۱۰ نشان داده شده است. نتایج حاکی از آن است که استفاده از بتن الیافی تأثیر قابل توجهی بر بهبود رفتار اتصال داشته و مقاومت نمونه تا ۲۲ درصد افزایش

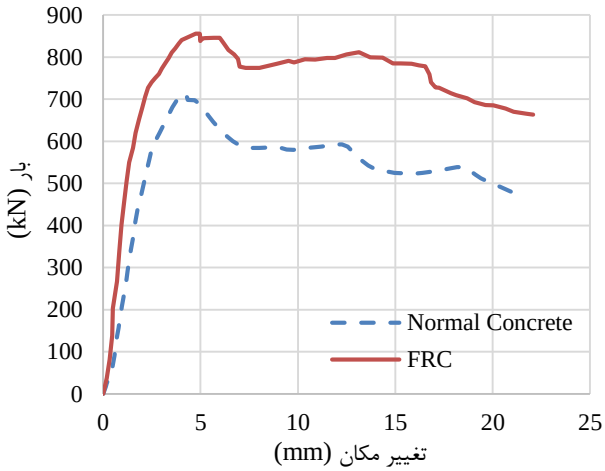
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-25]

[DOI: 10.61186/marineeng.20.44.6]

یافته است. همانطور که انتظار می‌رفت، مهمترین مزیت الیاف کنترل باز شدن عرض ترک است که می‌تواند رفتار اتصال بتنی را بهبود دهد. در اتصال بتن الیافی نسبت به بتن معمولی افزایش قابل توجهی در بار نهایی و شکل پذیری مشاهده می‌شود.



شکل ۹ – جزئیات بارگذاری نمونه تحت فشار



شکل ۱۰ – نمودار بار تغییر مکان اتصال با بتن ساده و بتن الیافی

مقطع برش خورده نمونه‌های بتن الیافی و بدون الیاف در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ نشان داده شده است. این برش‌ها امکان بررسی حالت شکست نمونه‌ها را فراهم کردند. مشاهده می‌شود که در هر دو نمونه تحت بارگذاری محوری، بتن در نزدیکی کلیدهای برشی خرد می‌شود و ترک‌های مورب از کلیدهای برشی شمع به کلیدهای برشی در سطح داخلی غلاف منتشر می‌شوند. بتن‌های اطراف کلید برشی تا زمانی که خورد شوند به مقاومت در برابر بار محوری ادامه می‌دهند. این نتایج با سایر تحقیقات هم راستا است که نشان داده‌اند ترک‌های مورب و خوردگی بتن معمولاً به صورت همزمان رخ می‌دهند [۶].



شکل ۱۱ – مود شکست بتن بدون الیاف الف) خورد شدکی بتن اطراف کلید برشی ب) ترک مورب برشی



شکل ۱۲ – مود شکست بتن الیافی الف) خورد شدکی بتن اطراف کلید برشی ب) ترک مورب برشی

در شکل ۱۳ تفاوت رفتار دو نوع بتن در کنار هم به نمایش درآمده است. مشخص است که در هر دو نمونه، ترک‌هایی از ناحیه کلیدهای برشی شکل گرفته‌اند. در نمونه بتن بدون الیاف، شکست کامل رخ داده و قطعات بتن از ناحیه کلیدهای برشی به طور کامل جدا شده‌اند، در حالی که در نمونه بتن الیاف دار، با وجود ترک‌های مورب در ناحیه کلید برشی، انسجام ساختاری بتن حفظ شده است. این موضوع به این معنی است که استحکام کششی بتن هم بر مقاومت در برابر ترک خوردگی و هم بر ظرفیت برشی تأثیر می گذارد که با توجه به ظاهر و دوام اتصال مهم است.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-25]

[DOI: 10.61186/marineeng.20.44.6]



شکل ۱۳ – نمونه‌های پس از شکست الف) بتن الیافی ب) بتن بدون الیاف

۳- مقایسه نتایج آزمایشگاهی با آیین نامه‌های مختلف

در این بخش روش‌های پیش‌بینی ظرفیت تحمل محوری اتصالات بتنی با کلیدهای برشی توسط چهار آیین نامه جاری مختلف تحت بررسی قرار می‌گیرد و با نتایج آزمایشگاهی مقایسه می‌شود.

آیین نامه HSE برای محا سبه مقاومت ات صال (f_{bk})، مطابق روابط (۱) و (۲)، اثر سختی شعاعی، طول اتصال، زبری سطح، ابعاد کلید برشی و مقاومت فشاری بتن را در نظر می‌گیرد [۱۳]:

$$f_{bk} = C_L\left(9C_s + 1100\frac{h}{s}\right)k f_{cu}^{0.5} \qquad (۱)$$

$$k = \left(\frac{D_p}{t_p} + \frac{D_s}{t_s}\right)^{-1} + \frac{1}{m}\left(\frac{D_g}{t_g}\right)^{-1} \qquad (۲)$$

که در روابط (۱) و (۲)، k ضـریب سـختی شـعاعی، f_{cu} مقاومت فشـاری نمونه مکعبی بتن، C_s ضـریب حالت سـطح اسـت که در مواقعی که نسـبت h/s>۰/۰۰۵ اسـت مقدار یک در نظر گرفته می‌شـود، m نسـبت مدول الاسـتسـیته فولاد به بتن اسـت و در مواقعی که مدول الاسـتسـیته فولاد مشـخص نیسـت می‌توان این مقدار را ۱۸ در نظر گرفت. ضـریب C_L را نیز می‌توان از جدول ۵ محاسبه کرد [۱۴].

API برای محاسـبه مقاومت اتصـال، با در نظر گفتن مکانیزم شکست در اطراف نقاط فشاری نزدیک کلیدهای بر شی و با آنالیز خطی نتایج آزمایشـگاهی و همچنین اثر مقاومت بتن و نسـبت ارتفاع به فاصـله کلیدهای برشـی رابطه (۳) را پیشـنهاد می‌کند [۱۲]. همچنین برای طراحی اتصـال و با در نظر گرفتن ضـریب اطمینان رابطه (۴) را پیشنهاد می‌کند.

جدول ۵ - مقادیر پارامتر CL

L/Dp	۲	۴	۸	≥ ۱۲
C_L	۱/۰	۰/۹	۰/۸	۰/۷

$$f_{bk} = 1.15 + 1.72 f_{cu}\frac{h}{s} \qquad (۳)$$

$$f_{bk} = 0.184 + .67 f_{cu}\frac{h}{s} \qquad (۴)$$

در DNV، ضـریب اصـطکاک بین فولاد و بتن با اسـتفاده از رابطه نیمه تجربی (۵) و (۶) در نظر گرفته می شود و فشار تما سی بین فولاد و بتن پس از تغییر شکل شعاعی اتصال به نیروی ا صطکاک برشی سطحی تبدیل می‌شود [۱۰].

$$f_{bk} = \frac{\mu E}{F}\left(\frac{h}{21s} f_{cu}^{0.4}\sqrt{\frac{t_p}{R_p}}\right)\frac{s}{L_g}N \qquad (۵)$$

$$f_{bk} = \frac{R_p}{t_p} + \frac{E t_g}{E_g R_p} + \frac{R_s}{t_s} \qquad (۶)$$

که در روابط (۵) و (۶)، L_g طول ات صال، μ ضریب ا صطکاک بین فولاد و بتن، E_g و E به ترتیب مدول الاسـتسـیته بتن و فولاد، F ضریب انعطاف پذیری شعاعی و N تعداد کلیدهای برشی هستند.

در DNV-GL، دو مود شـکسـت برای محاسـبه مقاومت اتصـال معرفی می‌شـود: مقاومت f_{bk} مربوط به مود لغزش اصـطکاکی و مقاومت f_{bkg} مربوط به مود شـکسـت بتن هسـت که به ترتیب در روابط (۷) و (۸) نشان داده شده‌اند [۱۵]:

$$f_{bk} = \left(\frac{800}{D_p} + 140\left(\frac{h}{s}\right)^{0.8}\right)k^{0.6} f_{cu}^{0.3} \qquad (۷)$$

$$f_{bkg} = \left(0.75 - \frac{1.4h}{s}\right)f_{cu}^{0.5} \qquad (۸)$$

تنش محوری نهایی موجود در اتصـال نیز از رابطه (۹) محاسـبه می‌شود:

$$f = \frac{P}{2R_p\pi L} \qquad (۹)$$

با توجه به روابط (۳) تا (۸) که مربوط به روابط آیین نامه ای هست و رابطه (۹) که می‌توان به کمک آن تنش برشی اتصال را محاسبه کرد، می‌توان نتایج آزمایشـگاهی را با روابط اشـاره شـده در آیین نامه‌ها مقایسه کرد.

در جدول ۶ تمایز بین مقاومت بر شی محا سبه شده تو سط آیین نامه‌های مختلف و نتایج آزمایشـگاهی اتصـال ارائه شـده اسـت. مشـاهده می‌شـود که برای بتن بدون الیاف نتیجه HSE با نتیجه آزمایشگاهی بسیار نزدیک است اما برای تخمین مقاومت بتن الیاف دارای اختلاف ۷ درصـدی اسـت. اما DNV GL برای هر دو نوع ات صال با اختلاف نزدیک ۳ در صدی می‌تواند رفتار ات صال را پیش بینی کند. در نهایت می‌توان نتیجه گرفت که DNV بیشـترین اختلاف را با نتایج آزمایشـگاهی دارد. پس از آن API، HSE و در

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-25]
[DOI: 10.61186/marineeng.20.44.6]

نهایت DNV GL نزدیک ترین عدد را به نتایج آزمایشــگاهی دارد که این موضوع با نتایج سایر محققین نیز همخوانی دارد [۱۴].

جدول ۶ - مقایسه نتایج آیین نامه‌های مختلف و نتایج آزمایشگاهی

نام آیین نامه	بتن معمولی			بتن الیافی		
	مقاومت برشی محاسبه شده (MPa)	نتیجه آزمایشگاهی (MPa)	اختلاف نتایج آزمایشگاهی و آیین نامه	مقاومت برشی محاسبه شده (MPa)	نتیجه آزمایشگاهی (MPa)	اختلاف نتایج آزمایشگاهی و آیین نامه
HSE (2002)	۵/۹۱	۵/۹۳	۰/۳ ٪	۶/۷۶	۷/۲۳	۷ ٪
API (2007)	۵/۰۱		۱۸/۴ ٪	۶/۱۸		۱۷ ٪
DNV (2013)	۴/۶۲		۲۸/۴ ٪	۵/۱۳		۴۰/۹ ٪
DNV-GL (2016)	۶/۱۳		۳/۴ ٪	۶/۹۹		۳/۴۳ ٪

۴- کلید واژگان

1- Det Norske Veritas
2- American Petroleum Institute
3- Health & Safety Executive
4- Normal Concrete
5- High Perfomance Concrete
6- Ultra High Perfomance Concrete
7- Polyvinyl Alcohol
8- Basalt Fiber
9- Polypropylene

۵ - نتیجه گیری

در این تحقیق، روشی برای بهبود رفتار اتصال شمع به غلاف فولادی با استفاده از الیاف فولادی مورد بررسی قرار گرفت. ابتدا طرح اختلاط پیشنهادی ارزیابی شد و مشخصات مکانیکی بتن از طریق آزمایش‌های مقاومت فشاری و خمشی سنجیده شد. نتایج به دست آمده به شرح زیر است:

- نتایج آزمایش‌ها روی بتن نشان داد که با اضافه کردن ۱/۵ درصد الیاف فولادی به طرح اختلاط، مقاومت فشاری بتن تا ۳۰ درصد و مقاومت خمشی نمونه‌ها تا ۴۰ درصد افزایش یافته است.
- بررسی رفتار اتصال نشان داد که مود شکست نمونه‌ها همانطور که انتظار می‌رفت به صورت ترکیبی از ترک مورب بین کلیدهای برشی و خورد شدن بتن زیر کلیدهای برشی بود. بنابراین عملکرد بتن پارامتر تعیین کننده مقاومت نهایی اتصال شناسایی می‌شود و نتایج تحقیق بر روی بتن موثر است.
- با افزودن ۱/۵ درصد الیاف فولادی به بتن، علاوه بر افزایش مقاومت نهایی اتصال تا ۲۲ درصد، بهبود قابل توجهی در شکل پذیری اتصال نیز ایجاد کرده است و رفتار کلی اتصال بهبود یافته است.
- مقایسه نتایج آزمایشگاهی با روابط پیشنهادی سه آیین‌نامه مختلف نشان داد که آیین‌نامه DNV بیشترین اختلاف را با نتایج آزمایشگاهی دارد. در حالی که آیین‌نامه‌های API و HSE نتایج بهتری ارائه کردند و در نهایت، آیین‌نامه DNV GL نزدیک‌ترین نتایج را به داده‌های آزمایشگاهی داشت.

۶ - مراجع

[1] Z. Weiqiu, L. Wuxu, Y. Tao, L. Deming and L. Lintao, "Model Test and Numerical Simulation of Grouted Connections for offshoreWind Turbine Under Static Axial Load," Marine Science and Engineering, 2020.

[2] C. Tao, C. Chengcheng, Z. Chihai, W. Xian, C. Ke and Y. Guokai, "Numerical modeling and parametric analysis of grouted connections under axial loading," Thin-Walled Structures, vol. 154, 2020.

[3] S. Anders and L. Lohaus, "Optimized High-Performance Concrete in Grouted Connections," Taylor & Francis Group, 2008.

[4] Z. Pu, Y. Jixing, P. Yuyang, F. Jiajun, i. G. Hu and P. Zuanfeng, "Experimental study on the mechanical properties of grouted sleeve joint

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-25]

[DOI: 10.61186/marineeng.20.44.6]

with the fiber-reinforced grouting material," Journal of Building Engineering, vol. 41, 2021.

[5] A. A. M. Aboubakr, Behaviour study of grouted connection for offshore wind turbin structures with brittle cement based grouts, Kassel, Germany: Faculty of Civil Engineering and Environmental at University of Kassel, 2020.

[6] L. Jeong Hwa, D. H. Won, J. Youn-Ju, K. Seong-Hwan and K. Young-Jong, "Interfacial shear behavior of a high-strength pile to sleeve grouted connection," Engineering Structures, vol. 151, pp. 704-723, 2017.

[7] D. Ziquan, D. P. Sze and R. L. JY, "Axial load resistance of grouted sleeve connection for modular construction," Thin-Walled Structures, no. 154, 2020.

[8] K. Wille, A. E. Naaman and G. J. Parra-Montesinos, "Ultra-High Performance Concrete with Compressive Strength Exceeding 150 MPa (22 ksi): A Simpler Way," ACI MATERIALS JOURNAL, 2011.

[9] K. Wille, A. E. Naaman, S. El-Tawil and G. J. Parra-Montesinos, "Ultra-high performance concrete and fiber reinforced concrete: achieving strength and ductility without heat curing," Materials and Structures, vol. 45, pp. 309-324, 2012.

[10] DNV-OS-J101, Offshore standard: design of offshore wind turbine structures., Norway: Det Norske Veritas AS, 2013.

[11] T. Chen, C. Huang, C. Zhang, X. Wang, Q. Zhao and G. Yuan, "Static behavior modeling of grouted connections under lateral loading for offshore wind turbine structures," Thin-Walled Structures, vol. 149, 2020.

[12] API, Recommended Practice for Planning, Designing, and Constructing Fixed offshore Platforms-Working Stress Design (API RP 2A-WSD), Washington, DC, USA: American Petroleum Institute (API), 2007.

[13] HSE, Pile/Sleeve Connections, Norwich, UK: Health & Safety Executive (HSE), 2001.

[14] X. You, Z. Wu and Z. Chen, "Comparison of Prediction Methods for Axial Strength of Grouted Connections with Shear Keys," Applied Sciences, vol. 10, no. 6, 2020.

[15] DNV GL, Support Structures for Wind Turbines (DNVGL-ST-0126), Norway, 2016: Det Norske Veritas (DNV), 2016.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-25]

[DOI: 10.61186/marineeng.20.44.6]