



مطالعه آزمایشگاهی کاشت چسبی میلگرد در بتن تحت بارهای کششی و برشی

کیوان انتظاری، محمد صادق معرفت*، عبدالله حسینی

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۰/۰۱/۲۶
بازنگری: ۱۴۰۰/۰۸/۱۳
پذیرش: ۱۴۰۰/۰۸/۲۸
ارائه آنلاین: ۱۴۰۰/۰۹/۱۱

کلمات کلیدی:

کاشت چسبی میلگرد
رفتار کششی و برشی
عمق کاشت
شکست پیوستگی
ضریب اطمینان

خلاصه: امروزه روش های متنوعی برای تقویت سازه ها توسعه پیدا کرده است و یکی از تکنیک های پرکاربرد کاشت میلگرد در اعضای بتنی است. هدف اصلی در این پژوهش بررسی کارایی و ایمنی کاشت میلگرد در شرایط کارگاهی نسبتاً خوب در ایران شامل تکنیک اجرا، چسب و بتن مصرفی است. بدین معنی که با فرض رعایت ضوابط آیین نامه ACI 318-19 و شرایط اجرایی نسبتاً خوب، اثر پارامترهایی همچون چسب موجود در ایران، طول مهار، فاصله میلگرد از لبه ی نمونه بتنی، و کاشت تکی و گروهی، در نمونه های مسلح و غیرمسلح بررسی شود. برای این منظور، هشت آزمایش کشش و هشت آزمایش برش بر روی نمونه میلگردهای کاشته شده انجام شد. کاشت توسط چسب اپوکسی دو جزئی هیلتی صورت گرفت و مطالعات نشان داد که با افزایش عمق کاشت و فاصله گرفتن از لبه ی نمونه بتنی، هم ظرفیت کششی و هم برشی افزایش پیدا می کند. در کاشت گروهی، با کاهش فاصله میلگردها، مقاومت اولیه بین چسب و بتن کاهش می یابد و دلیل آن ایجاد ترک بین دو میلگرد است. در نهایت، نتایج به دست آمده از آزمایش ها با روابط آیین نامه ACI 318-19 مقایسه گردید. مقایسه نشان داد آیین نامه مذکور با ضریب اطمینان حداقل ۱/۵ برای کشش و ضریب اطمینان ۲ برای برش، ظرفیت میلگردهای کاشته شده را پیش بینی می کند.

۱- مقدمه

صورتی که مود شکست بتن رخ ندهد، ظرفیت گسیختگی برشی میلگرد تعیین کننده ظرفیت نهایی می باشد. در سال ۱۹۹۳ کوک^۲ [۲] رفتار میلگرد کاشته شده در بتن را تحت اثر کشش مطالعه کرد. مطالعات نشان داد که دلیل شکست پیوستگی بدون تشکیل مخروط بتن، جدا شدگی چسب در قسمت بالایی محل کاشت از دیواره سوراخ کاشت می باشد. بعدها در سال ۱۹۹۵، الیگهاوسن و بالوغ^۳ [۳] دریافتند ترک خوردگی بتن بر روی مقاومت کششی میلگرد تأثیر قابل ملاحظه ای می گذارد و دلیل این مسأله را از بین رفتن پیوستگی بین بتن و چسب معرفی کردند. در همان سال فوج و همکاران^۴ [۴] به این نتیجه رسیدند که مقاومت پیوستگی میلگرد کاشته شده با افزایش عمق کاشت، بزرگ می شود. هر چند این افزایش مقاومت پس از عمق مشخصی، حدوداً نه برابر قطر میلگرد، تقریباً متوقف می شود. یک سال بعد مکوی و همکاران^۵ [۵] یکی از علل اصلی گسیختگی میلگرد کاشته شده تحت بار کششی را عمق کاشت زیاد و چسب قوی بیان

در طول چند دهه ی اخیر، به ویژه بعد از چند زلزله مخرب، بهسازی سازه های موجود به یکی از دغدغه های مهم برای مهندسين در سراسر جهان تبدیل شده است. در این راستا، روش های تقویت ساختمان ها موضوع مطالعات متعدد واقع گشته و روش های متنوعی برای ترمیم، مقاوم سازی و بهسازی ارائه شده است. یکی از تکنیک های متداول در این زمینه، استفاده از مهارهای چسبنده است. این روش کاربرد فراوانی در صنعت ساختمان دارد و در ایران نیز برای اضافه نمودن سیستم لرزه بر جدید به سازه موجود، تقویت و گسترش شالوده ها، اتصال اجزای فولادی به سازه بتنی و رفع نواقص و ایرادات حین ساخت به کار می رود.

مطالعات فراوانی در مورد تکنیک کاشت میلگرد در بتن در منابع متعدد گزارش شده است. در سال ۱۹۷۱ اولگارد و همکاران^۱ [۱] تعداد ۴۸ آزمایش برش روی میلگرد کاشته شده در بتن انجام دادند. آزمایش ها نشان داد که ظرفیت فشاری بتن و مدول الاستیسیته آن بر رفتار برشی موثر است و در

2 Cook
3 Eligehausen and Balogh
4 Fuchs et al.
5 McVay et al.

1 Ollgaard et al.

* نویسنده عهده دار مکاتبات: mmarefat@ut.ac.ir



همچنین آزمایش‌ها نشان داد مدل ارائه شده توسط الیگهاوسن و همکاران [۱۱] رفتار تحت کشش، و مدل ارائه شده توسط اولگارد و همکاران [۱] رفتار تحت برش را به خوبی پیش‌بینی می‌کند. از سوی دیگر، روابط ارائه شده در آیین‌نامه بتن آمریکا [۱۳] مقاومت را بسیار دست پایین پیش‌بینی می‌کند. ونگ و همکاران^۶ [۱۴] در سال ۲۰۱۵ رفتار میلگردهای کاشت شده با سایز بزرگ را در پی‌های بتنی مورد مطالعه قرار دادند. هدف آن‌ها رسیدن به یک مقدار بهینه از ظرفیت کششی میلگرد و ظرفیت پیوستگی چسب و بتن بود. بدین منظور میلگرد با سایزها و عمق‌های مختلف در بتن کاشت شد و نتایج نشان داد که با افزایش سایز میلگرد ظرفیت بیرون کشیده شدن میلگرد بالا رفت و مود شکست از بیرون آمدن میلگرد به مود شکست مخروطی بتن تغییر پیدا کرد. تاکاسی^۷ [۱۵] در سال ۲۰۱۹ رفتار میلگرد کاشت شده تحت بار همزمان کششی و برشی را مورد آزمایش و مطالعه عددی قرار داد. آزمایش‌ها نشان داد هر چه بار کششی اولیه افزایش پیدا کند، ظرفیت برشی میلگرد کاهش پیدا می‌کند. در همان سال بسام و همکاران^۸ [۱۶] مطالعه‌ای آزمایشگاهی بر روی کاشت چسبی میلگرد با انواع مختلف مواد چسباننده انجام دادند. مطالعات نشان داد که ظرفیت کششی چسب‌های اپوکسی تقریباً مشابه یکدیگر است ولی در مقایسه با چسب‌های پایه سیمانی ظرفیت کششی بسیار بالاتری دارند. همچنین با افزایش عمق کاشت و قطر میلگرد (افزایش ظرفیت کششی) مود شکست ترک عرضی بتن حاکم می‌شود. در سال ۲۰۲۰ موسوی سیامکانی و همکاران^۹ [۱۷] مطالعه عددی و آزمایشگاهی را با در نظر گرفتن ظرفیت باربری، جابجایی، مودهای شکست و هندسه شکست مخروطی بتن انجام دادند. این مطالعه نشان داد که ترک‌ها اغلب در اطراف میلگرد کاشت شده تشکیل می‌شوند و با نزدیک‌تر شدن به سطح بتن، کرنش افزایش پیدا می‌کند. در سال ۲۰۲۱ خونداکر و همکاران^{۱۰} [۱۸] مطالعه‌ای آزمایشگاهی گسترده‌ای بر روی میلگردهای پر مقاومت کاشت شده در بتن انجام دادند. هدف کاهش آسیب به سازه موجود از طریق کاهش تعداد سوراخ‌کاری برای کاشت میلگرد بود که با استفاده از میلگردهای پر مقاومت حاصل می‌شد. آزمایش‌ها نشان داد که اغلب مودهای شکست ناشی از خرابی بتن می‌باشد و تأثیر میلگرد و چسب کاشت کم است. لذا نمی‌توان صرفاً با افزایش ظرفیت میلگرد تعداد سوراخ‌کاری را کاهش داد.

کردند. کوک و همکاران [۶] در سال ۱۹۹۸ آزمایش‌هایی به منظور بررسی تأثیر مقاومت فشاری بر روی مقاومت پیوستگی انجام دادند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که در بتن با مقاومت ۲۰ تا ۶۰ مگاپاسکال، مقاومت فشاری بتن تأثیر چندانی بر مقاومت چسبندگی بین چسب و بتن نمی‌گذارد، و بر خلاف انتظار، با افزایش ظرفیت فشاری بتن، ظرفیت کششی میل‌مهار تغییر زیادی نمی‌کند. در همان سال لیر^۱ و الیگهاوسن [۷] آزمایش‌هایی را بر روی مهارهای چسبنده چهار تایی انجام دادند که مشخص شد با نزدیک‌تر شدن مهارها در کاشت گروهی به یکدیگر ریشه‌های تنش در عمق با یکدیگر ادغام می‌شوند و در نتیجه ظرفیت کمتری نسبت به چهار برابر ظرفیت مهار تکی به دست می‌آید. در سال ۲۰۰۱، چولاک^۲ [۸] به این نتیجه رسید که ظرفیت نهایی میلگرد کاشت شده با افزایش عمق، بزرگ می‌شود، ولی این افزایش رابطه خطی با افزایش عمق ندارد، و نسبت غیرخطی پس از عمق کاشت ۷۵ میلی‌متر شروع می‌شود. در سال ۲۰۰۲، تاستانی و همکاران^۳ [۹] اثر تکیه‌گاه‌های برپایش آزمایش کشش را مورد آزمون قرار دادند. مطالعات نشان داد که هر اندازه تکیه‌گاه به محل کاشت میلگرد نزدیک‌تر باشد، به دلیل وارد شدن عکس‌العمل نیروی کشش به سطح بتن، ظرفیت باربری بزرگ‌تری ثبت می‌شود. در سال ۲۰۰۵، گس اوغلو و همکاران^۴ [۱۰] دریافتند در عمق کاشت کم، به دلیل حاکم بودن مود شکست مخروطی بتن، مقاومت بتن بر روی ظرفیت میل‌مهار تأثیر مثبت می‌گذارد، ولی با افزایش عمق و حاکم شدن مود شکست پیوستگی و مود گسیختگی میلگرد، تأثیر مقاومت بتن کاهش می‌یابد. در سال ۲۰۰۶، الیگهاوسن و کوک [۱۱] با استفاده از مدل‌سازی عددی و مطالعات آزمایشگاهی، مدلی رفتاری برای کاشت میلگرد ارائه دادند. نتایج آزمایشگاهی نشان داد که برای کاشت گروهی، وقتی فاصله میلگردها کم است، بتن بین میلگردها تأثیر چندانی بر مقاومت ندارد و فقط بتن پیرامونی بر مقاومت تأثیر می‌گذارد. مطالعه نشان داد که با افزایش فاصله بین گروه میلگرد چهارتایی از ۵۰ میلی‌متر به ۱۵۰ میلی‌متر، ظرفیت گروه چهارتایی تا حدود ۳/۵ برابر کاشت تکی افزایش پیدا می‌کند. ولی پس از آن افزایش فاصله کاشت تأثیر چندانی بر مقاومت نهایی ندارد. در سال ۲۰۱۵ اییکچی و همکاران^۵ [۱۲] میلگردهای کاشته شده تکی و گروهی را تحت بارهای کششی و برشی آزمایش کردند. رفتار گروهی و تکی میلگردها در برش و کشش بررسی شد و عوامل مؤثر بر آن‌ها مشخص شد.

6 Wang et al.

7 Takase

8 Bassam et al.

9 Mousavi Siamakani et al.

10 Khondaker et al.

1 Lehr

2 Çolak

3 Taştani et al.

4 Gesoğlu et al.

5 Epackachi et al.

انجام شود به طوری که تکیه‌گاه‌ها با فاصله نسبتاً زیاد از میلگرد قرار گیرد، انواع مودهای محتمل شکست از جمله مخروط ناقص^۳ و پیوستگی^۴ نیز امکان وقوع دارد. لذا به منظور مشاهده‌ی مودهای مذکور و همچنین به حداقل رساندن اثرات شرایط خارجی، از این روش استفاده شده است.

۲-۲-۱- آزمایش کشش

در شکل ۵ برپایش آزمایشگاهی مربوط به اعمال بار کششی نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود تکیه‌گاه‌های برپایش، به اندازه ۱/۵ برابر عمق کاشت میلگرد از یکدیگر فاصله دارند. برای ثبت جابجایی میلگرد، تغییر مکان‌سنج‌هایی با دقت یک هزارم میلی‌متر و طول گیج ۲۵ میلی‌متر مورد استفاده قرار گرفته است. با توجه به اینکه جابجایی میلگرد کاشت شده دقیقاً روی نمونه بتنی مد نظر بود، از دو شاخک فولادی متصل به میلگرد کاشت شده استفاده شد تا تغییر مکان‌سنج‌ها زیر آن نصب گردد.

۲-۲-۲- آزمایش برش

در شکل ۶ برپایش آزمایشگاهی مربوط به اعمال بار برشی نشان داده شده است. برای رعایت فاصله تکیه‌گاهی، پروفیل افقی زیر جک به وسیله دو ستونک کناری، عکس‌العمل بار وارده را به میزان ۱/۵ برابر فاصله کاشت از لبه نمونه بتنی از میلگرد کاشت شده دور می‌کند. همان‌طور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، بار برشی از طریق ورق فولادی به ضخامت ۴۰ میلی‌متر و یک میله با سایز ۳۲ میلی‌متر به میلگردهای کاشت شده در بتن اعمال می‌شود. برای ثبت جابجایی میلگرد کاشت شده در بتن در راستای اعمال بار برشی، روی ورق ۴۰ میلی‌متری تسمه‌هایی متصل شد تا تغییر مکان‌سنج‌ها روی آن نصب شوند.

۳- مشاهدات و نتایج

۳-۱- آزمایش کشش

در آزمایش TTS-1 که مربوط به میلگرد کاشت شده به عمق ۱۵ سانتی‌متر (۱۰ برابر قطر میلگرد) در نمونه بتنی غیرمسلح است، تخریب به صورت مخروط ناقص بتنی (شکل ۷-الف)، و در آزمایش‌های TTS-2 و TTS-3 که در نمونه مسلح کاشت شده بودند ایجاد ترکی به شکل دایره به قطر ۷ سانتی‌متر به مرکزیت میلگرد کاشت شده (شکل ۷-ب و ۷-پ) اتفاق افتاد که نشانگر مود شکست پیوستگی است. لذا در مواردی که بستر کاشت بتن غیرمسلح است، شکست خود بستر بتنی عامل اصلی تخریب بوده و میلگرد سالم می‌ماند. از طرفی در آزمایش TTS-4 با افزایش عمق کاشت

در این تحقیق رفتار میلگردهای کاشته شده در بتن به وسیله چسب اپوکسی هیلتی^۱ تحت بارهای کششی و برشی مورد آزمایش و بررسی قرار می‌گیرد. هدف از این مطالعه بررسی رفتار میلگردها در شرایط کارگاهی نسبتاً خوب در ایران شامل تکنیک اجرا، چسب و بتن مصرفی است. هدف دیگر ارزیابی ضوابط آیین‌نامه‌ای متداول برای محاسبات مربوطه می‌باشد. به منظور نیل به این هدف، هشت آزمایش کشش و هشت آزمایش برش شامل آزمایش بر روی مهار تکی و گروهی انجام گرفت و دو گروه از نمونه‌ها شامل نمونه بتنی مسلح و غیرمسلح استفاده گردید.

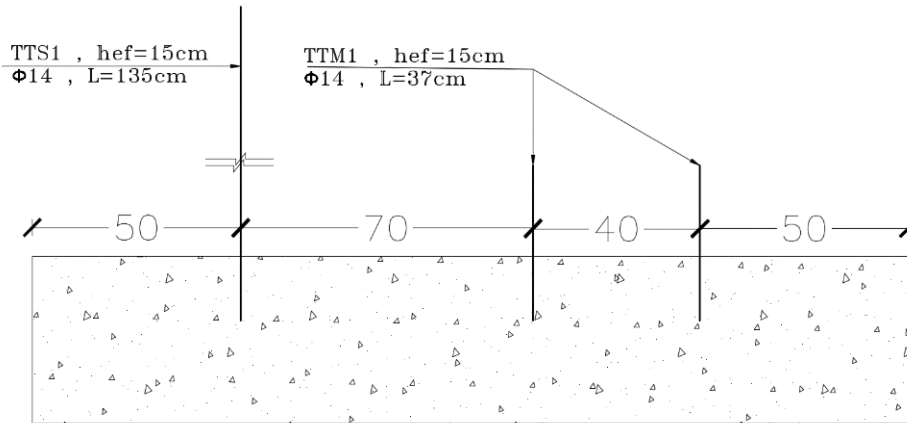
۲- برنامه کار آزمایشگاهی

۲-۱- مشخصات نمونه‌ها

به منظور بررسی رفتار میلگردها تحت بار کششی و برشی بر روی نمونه‌های بتنی مسلح و غیرمسلح دو دسته نمونه ساخته شد. در همه نمونه‌ها میلگردها به وسیله چسب اپوکسی دو جزئی هیلتی در داخل سوراخ‌های آماده شده کاشته شد. پارامترهای مورد نظر شامل عمق کاشت، فاصله میلگردها از یکدیگر در کاشت گروهی، فاصله میلگرد از لبه نمونه و عملکرد گروهی می‌باشد. شایان ذکر است دستورالعمل‌های سازنده چسب و ضوابط آیین‌نامه‌های مربوطه [۱۹-۲۲] در ساخت و آزمایش نمونه‌ها رعایت گردید. در کلیه آزمایش‌ها، قطر میلگردهای کاشته شده برابر ۱۴ میلی‌متر و قطر سوراخ ایجاد شده در بتن ۲۰ میلی‌متر می‌باشد. عمق کاشت میلگردها در آزمایش کشش ۱۵۰ و ۲۰۰ میلی‌متر و در آزمایش برش ۱۵۰ میلی‌متر است. در کاشت‌های گروهی فاصله مرکز به مرکز آرماتورها در آزمایش کشش ۲۰۰ و ۴۰۰ میلی‌متر و در آزمایش برش ۳۰۰ میلی‌متر می‌باشد. در آزمایش‌های کشش، میلگردها در وسط نمونه بتنی و در آزمایش‌های برش میلگردها در فواصل ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ میلی‌متری از لبه نمونه بتنی کاشت شده است. شایان ذکر است متوسط ظرفیت فشاری نمونه‌های بتنی استوانه‌ای در روز آزمایش برابر ۲۹ مگاپاسکال بود. در ادامه جزئیات نمونه‌ها در شکل‌های ۱ تا ۴ ارائه شده است. در شکل‌های مذکور h_{ef} عمق موثر کاشت و L طول میلگرد می‌باشد.

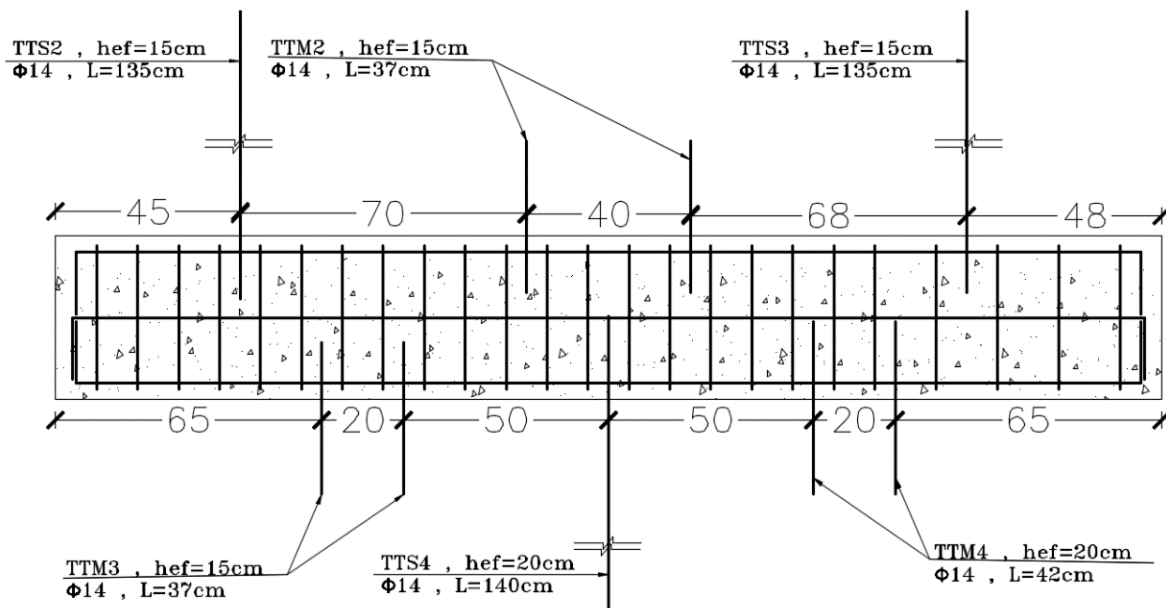
۲-۲- برپایش آزمایشگاهی و ابزار دقیق

به منظور اعمال بار به میلگرد کاشته شده در بتن لازم است که شرایط تکیه‌گاهی نمونه مورد توجه قرار گیرد. اگر آزمایش به صورت محدود نشده^۲



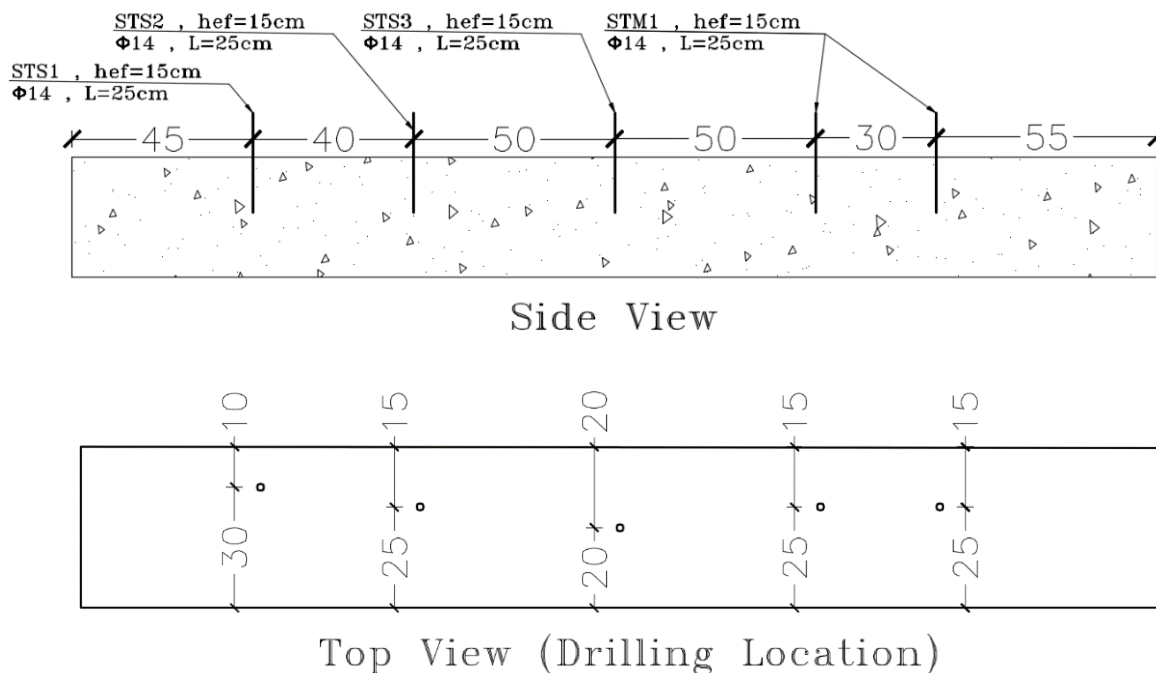
شکل ۱. محل کاشت میلگردها در آزمایش کشش (نمونه UC-T)

Fig. 1. Location of post installed anchors in tension test (UC-T sample)



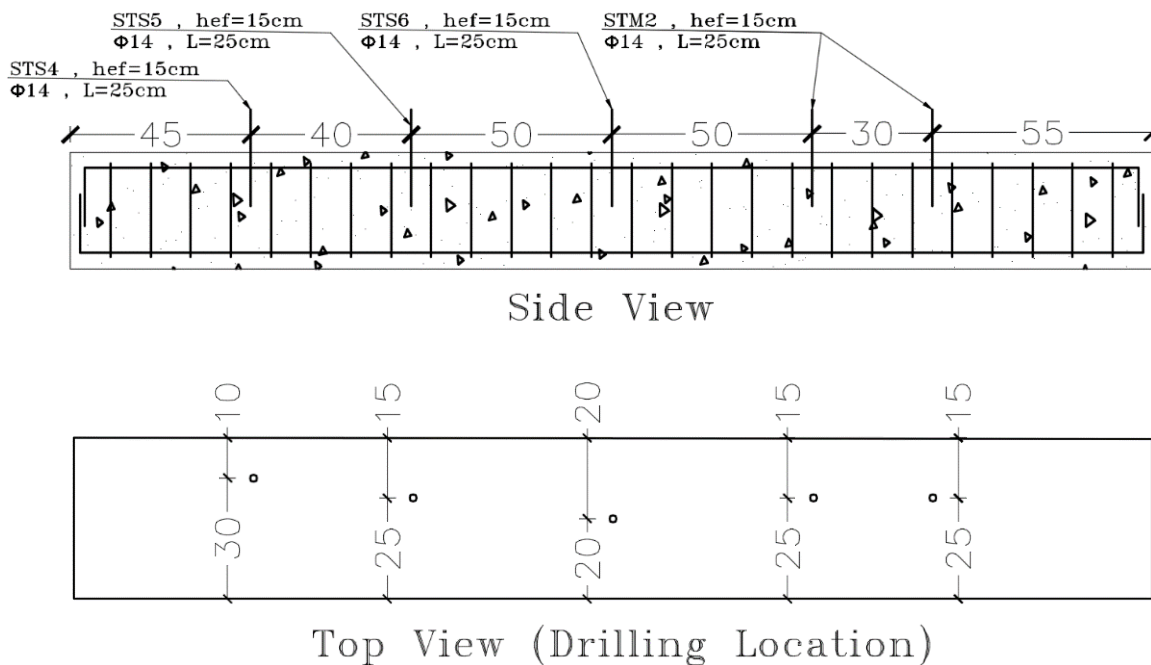
شکل ۲. محل کاشت میلگردها در آزمایش کشش (نمونه RC-T)

Fig. 2. Location of post installed anchors in tension test (RC-T sample)



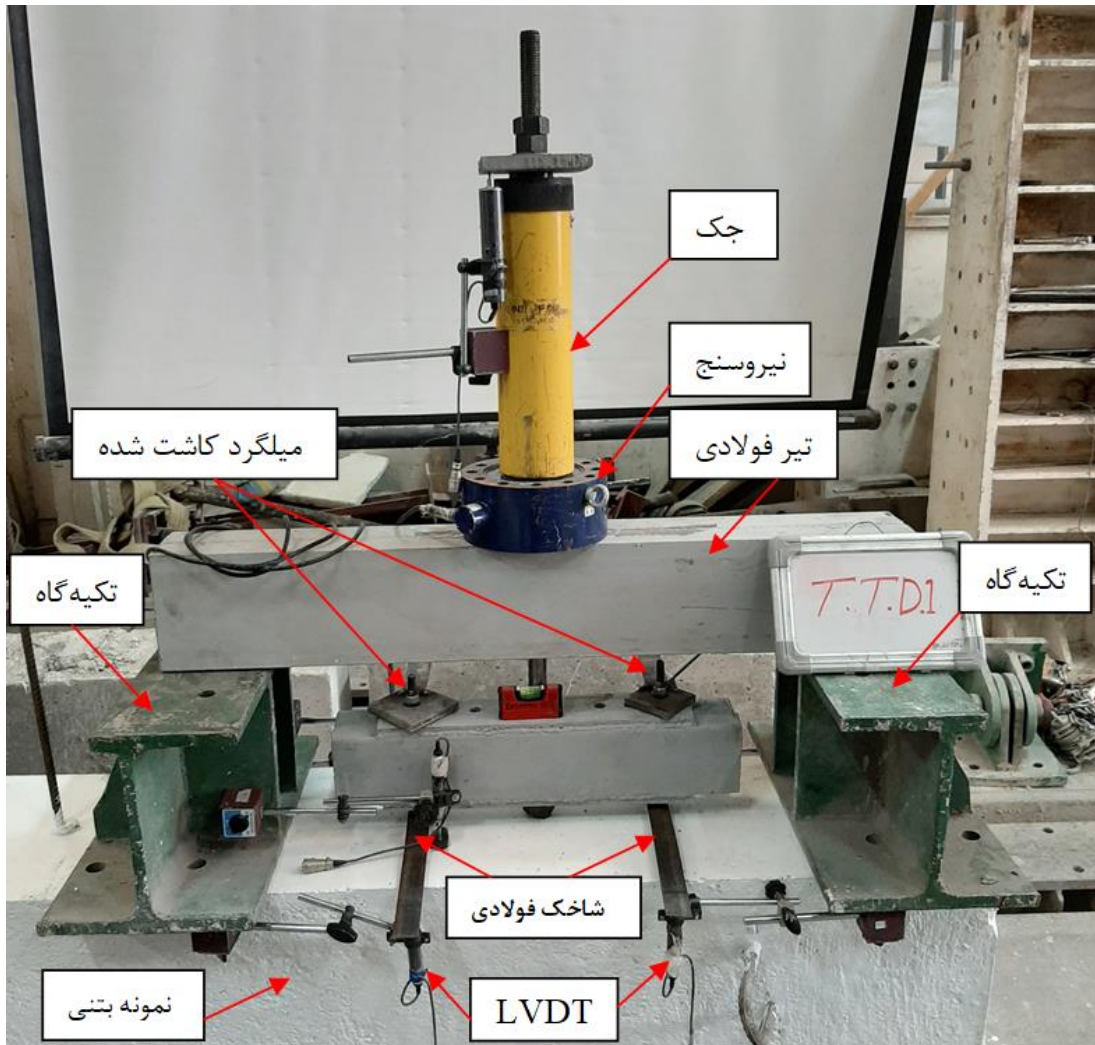
شکل ۳. محل کاشت میلگردها در آزمایش برش (نمونه UC-Sh)

Fig. 3. Location of post installed anchors in shear test (UC-Sh sample)



شکل ۴. محل کاشت میلگردها در آزمایش برشی (نمونه RC-Sh)

Fig.4. Location of post installed anchors in shear test (RC-Sh sample)



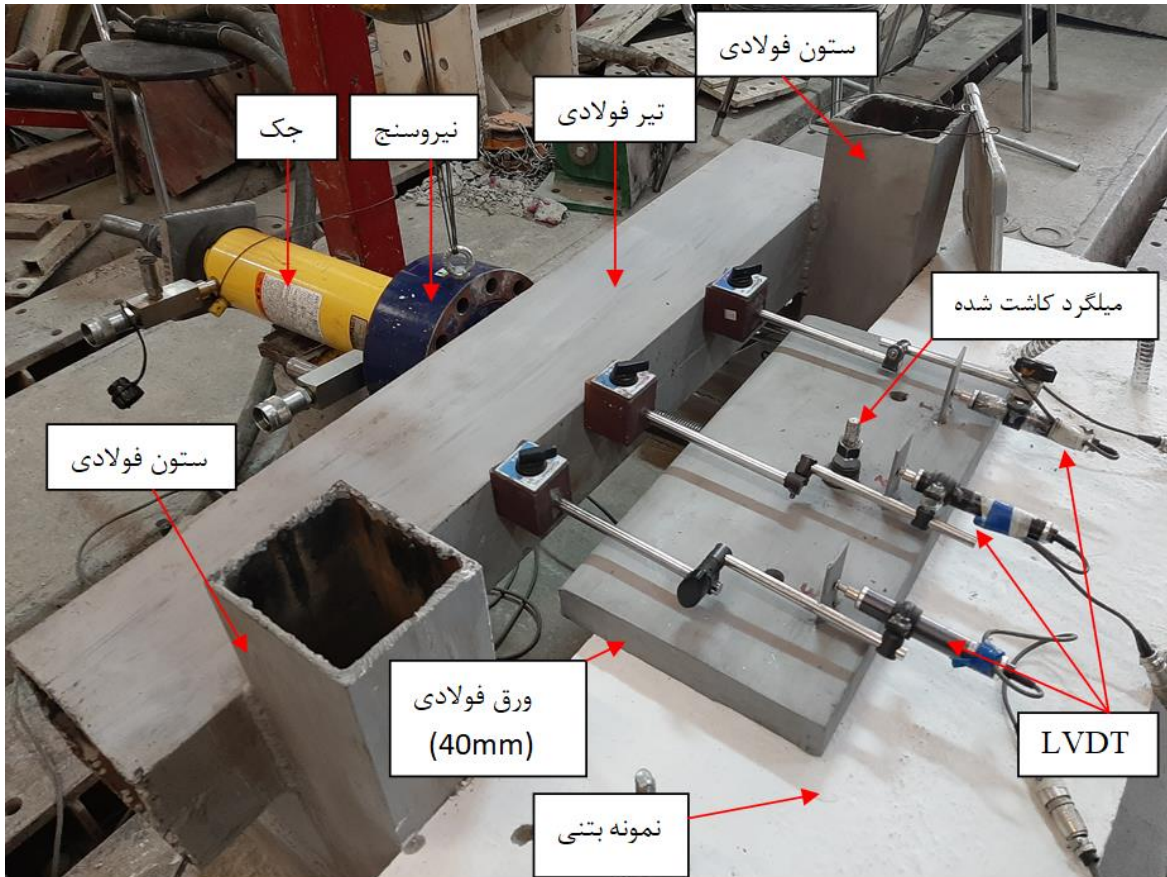
شکل ۵. برپایش آزمایش کشش گروهی

Fig. 5. Tension test setup

کاشت میلگرد روی آن انجام می‌پذیرد را نشان می‌دهد، به طوری که حتما باید بستر مربوطه قادر به تحمل بارهای وارده باشد و در نظر گرفتن مقاومت میلگرد کاشت شده به وسیله چسب نمی‌تواند به تنهایی ضامن باربری سیستم نهایی باشد. در آزمایش TTM-2 که مشابه آزمایش TTM-1 است با این تفاوت که در نمونه مسلح کاشت شده است در اطراف هر دو میلگرد کاشت شده ترک‌های دایره‌ای و ترک‌های شعاعی شکل گرفت که نشانگر بیرون کشیده شدن میلگرد و مود شکست پیوستگی می‌باشد (شکل ۷-ج). با مقایسه ترک‌های عرضی ناشی از خمش نمونه بتنی با حالت قبل که کل نمونه شکسته بود می‌توان به اهمیت ظرفیت باربری بستر کاشت میلگرد و تأثیر آن بر مود شکست نهایی پی برد.

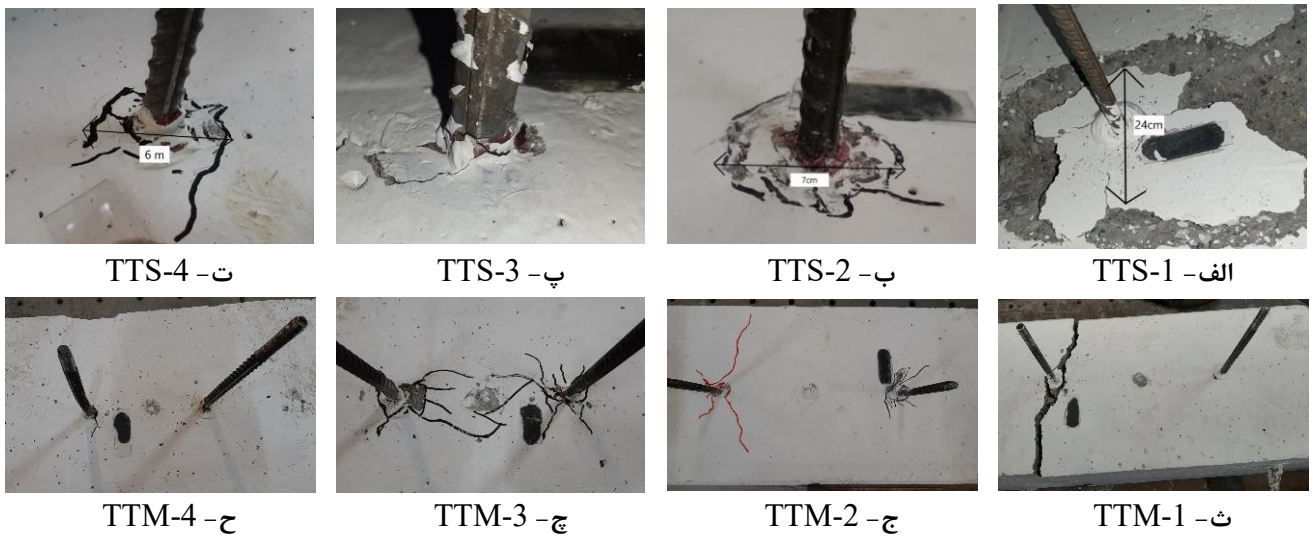
از ۱۵ به ۲۰ سانتی‌متر در نمونه مسلح، قطر ترک‌های اطراف میلگرد کاهش پیدا کردند و تخریب غالب مود شکست پیوستگی می‌باشد (شکل ۷-ت). کاهش چشمگیر میزان ترک‌های اطراف میلگرد کاشت شده نشانگر مناسب بودن عمق کاشت ۲۰ سانتی‌متر (۱۵ برابر قطر میلگرد) برای جلوگیری از لغزش چسب و استفاده از حداکثر ظرفیت آرماتور کاشت می‌باشد.

در آزمایش TTM-1 که مربوط به کاشت گروه میلگرد دوتایی به عمق ۱۵ سانتی‌متر (۱۰ برابر قطر میلگرد) و فاصله ۴۰ سانتی‌متر (حدود ۳ برابر عمق کاشت) در نمونه بتنی غیرمسلح می‌باشد، مشاهده شد نمونه بتنی در اثر ترک‌خوردگی عرضی به طور کامل نصف شد و در واقع مقاومت خمشی مقطع بتنی حاکم بر تخریب شد و ظرفیت پیوستگی میلگردها به طور کامل فعال نگردید (شکل ۷-ث). این آزمایش اهمیت بالای بستری که



شکل ۶. برپایش آزمایش برش

Fig. 6. Shear test setup



شکل ۷. نمونه های کاشت شده در بتن در پایان آزمایش کشش

Fig. 7. Post-installed anchors at the end of tensile tests

جدول ۱. حداکثر ظرفیت اسمی و نهایی آزمایش های کشش و مود شکست مربوطه

Table 1. Maximum nominal and ultimate strength of tension tests and their failure modes

| نام آزمایش | ظرفیت اسمی (kN) | حداکثر ظرفیت آزمایش (kN) | مود شکست |
|------------|-----------------|--------------------------|---------------|
| TTS-1 | ۵۲/۷ | ۶۷/۶ | مخروط ناقص |
| TTS-2 | ۵۲/۳ | ۷۱/۷ | پیوستگی |
| TTS-3 | ۵۱/۸ | ۷۲/۱ | پیوستگی |
| TTS-4 | ۶۲/۳ | ۷۶/۵ | پیوستگی |
| TTM-1 | ۹۸/۹ | ۹۸/۹ | ترک عرضی خمشی |
| TTM-2 | ۱۱۸/۳ | ۱۴۹/۰ | پیوستگی |
| TTM-3 | ۱۰۳/۰ | ۱۵۲/۷ | پیوستگی |
| TTM-4 | ۱۳۰/۰ | ۱۴۹/۲ | پیوستگی |

در شکل ۹ نیز مشاهده می شود در کاشت های گروهی حتی با کاهش فاصله کاشت از ۴۰ سانتی متر (حدود ۳ برابر عمق کاشت) به ۲۰ سانتی متر (حدود ۱/۵ برابر عمق کاشت)، همچنان ظرفیت پیوستگی بین بتن و میلگرد نسبت به حالت کاشت تکی دو برابر شده است. این واقعیت نشان می دهد فاصله تأثیر کاشت های گروهی که در آیین نامه بتن آمریکا [۱۳] ارائه شده است سخت گیرانه می باشد.

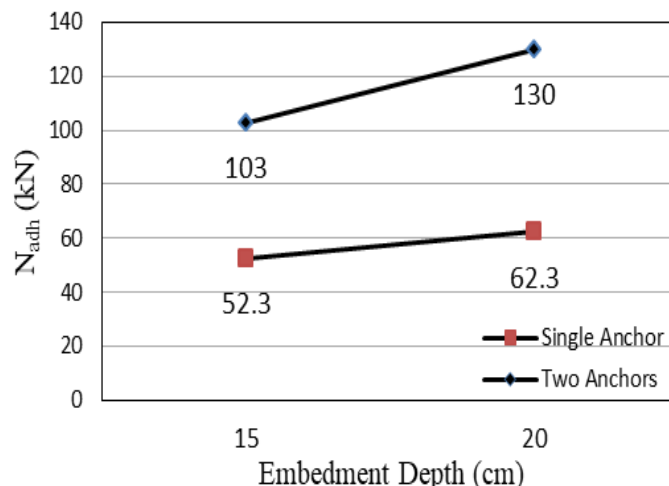
۳-۲- آزمایش های برش

در آزمایش برش STS-1 که مربوط به میلگرد کاشت شده به عمق ۱۵ سانتی متر (۱۰ برابر قطر میلگرد) در نمونه بتنی غیر مسلح با ۱۰ سانتی متر (۶ برابر قطر میلگرد) فاصله از لبه نمونه بتنی می باشد، مود شکست مخروط ناقص اتفاق افتاد (شکل ۱۰-الف). با توجه به فاصله ۱۰ سانتی متری میلگرد از لبه، مشاهده می شود که مخروط با زاویه ی حدود ۴۵ درجه تشکیل شده است ولی اثرات آن تا فاصله ۱/۵ برابر فاصله کاشت از لبه مشاهده می شود که با فرضیات آیین نامه بتن آمریکا [۱۳] مطابقت دارد. در آزمایش برشی STS-2 نمونه غیرمسلح، با افزایش فاصله کاشت از لبه به ۱۵ سانتی متر نتایج مشابه نمونه قبل حاصل شد (شکل ۱۰-ب). در آزمایش STS-3 در نمونه غیرمسلح، با رسیدن فاصله کاشت به ۲۰ سانتی متر از لبه، میلگرد به طور کامل خم شده است (شکل ۱۰-پ). مشاهده می شود که با قرار دادن میلگرد کاشت در ۲۰ سانتی متری لبه، مود شکست مخروط ناقص تشکیل نشد و تنها با خرد شدن بتن جلوی میلگرد، تخریب حاصل شده است.

در آزمایش TTM-3 که مربوط به کاشت گروه میلگرد دوتایی به عمق ۱۵ سانتی متر (۱۰ برابر قطر میلگرد) و فاصله ۲۰ سانتی متر (حدود ۱۵ برابر قطر میلگرد) در نمونه بتنی مسلح می باشد (شکل ۷-ج)، مشاهده می شود که با کاهش فاصله میلگردهای کاشت شده از ۴۰ به ۲۰ سانتی متر اندرکنش میلگردها افزایش پیدا می کند؛ به طوری که ترک های زیادی بین دو میلگرد تحت بار کششی ایجاد شد. شایان ذکر است در آزمایش TTM-4 نیز با افزایش عمق کاشت از ۱۵ سانتی متر به ۲۰ سانتی متر کاهش ترک های مربوط به لغزش چسب مشاهده گردید (شکل ۷-ح).

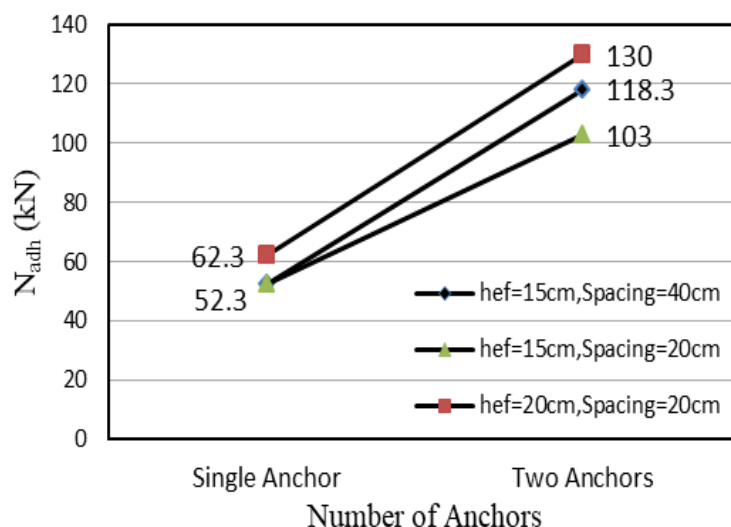
نتایج مربوط به حداکثر ظرفیت اسمی و نهایی آزمایش کشش در جدول ۱ ارائه شده است. همانطور که مشخص است، میلگرد تکی کاشته شده در بتن غیرمسلح (آزمایش TTS-1) مقاومتی نزدیک به نمونه های مشابه کاشته شده در بتن مسلح (سطرهای ۲ و ۳ در جدول ۱) دارد. ظرفیت نزدیک در نمونه بتنی مسلح و غیرمسلح نشان می دهد، کاشت تکی در نمونه مسلح و غیرمسلح ظرفیت های کمابیش یکسانی از خود نشان می دهد.

از طرفی با توجه به شکل ۸ مشاهده می شود، با افزایش عمق کاشت تک میلگرد از ۱۵ سانتی متر (۱۰ برابر قطر میلگرد) به ۲۰ سانتی متر (۱۵ برابر قطر میلگرد)، ظرفیت اسمی از حدود ۵۲/۳ کیلونیوتن به ۶۲/۳ کیلونیوتن افزایش پیدا می کند. ولی در آزمایش گروه میلگرد، با افزایش عمق کاشت از ۱۵ سانتی متر به ۲۰ سانتی متر ظرفیت اسمی از ۱۰۳ کیلونیوتن به ۱۳۰ کیلونیوتن افزایش پیدا می کند؛ لذا با افزایش حدود ۳۰ درصدی در عمق کاشت، ظرفیت تک میلگرد افزایشی به میزان ۲۰ درصد، و ظرفیت گروه میلگرد افزایشی به میزان ۳۰ درصد تجربه کرده است.



شکل ۸. تأثیر عمق کاشت در ظرفیت پیوستگی میلگرد کاشت شده در بتن

Fig. 8. Effect of embedment depth on bond strength of post-installed anchors

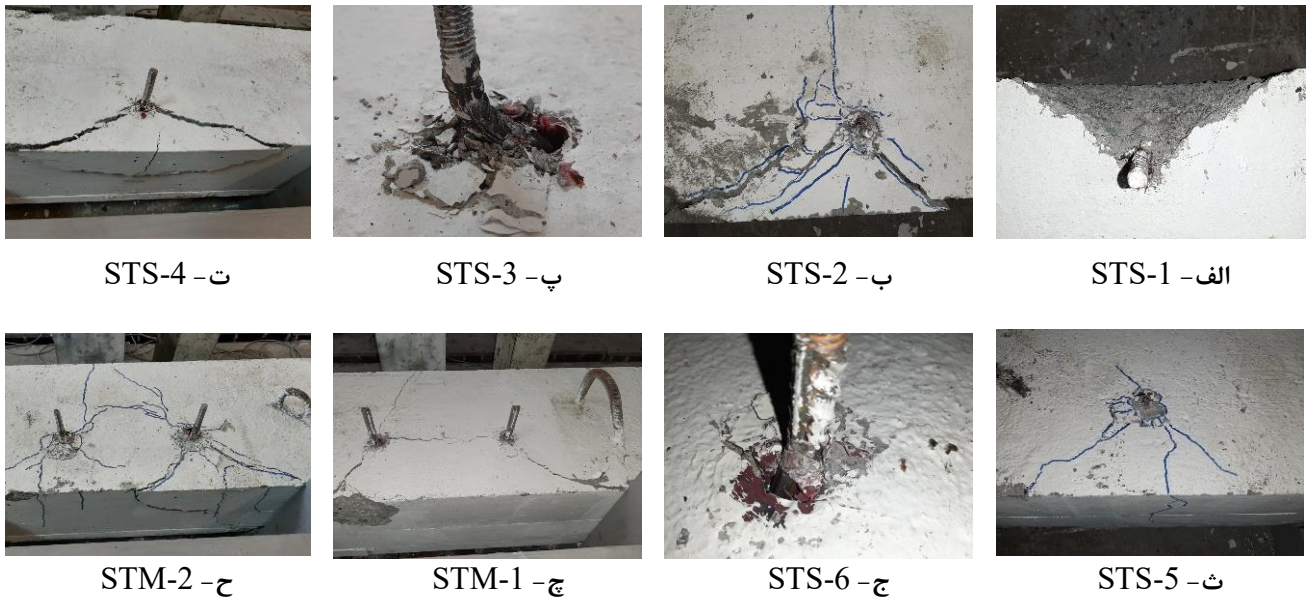


شکل ۹. تأثیر کاشت گروهی در ظرفیت پیوستگی میلگرد کاشت شده در بتن

Fig. 9. Effect of grouping on bond strength of post-installed anchors

افزایش فاصله کاشت از لبه به ۱۵ سانتی‌متر ترک‌های مربوط به مود شکست مخروط ناقص با زاویه ۴۵ درجه ایجاد شد، ولی به دلیل تقدم مود شکست برشی میلگرد، این مود گسترش پیدا نکرده است (شکل ۱۰-ت). در آزمایش STS-6 با رسیدن فاصله کاشت از لبه به ۲۰ سانتی‌متر در نمونه بتنی مسلح، مود شکست برش میلگرد، بدون تشکیل مود شکست مخروط ناقص و حتی ترک‌های موضعی ناشی از این مود، رخ داد (شکل ۱۰-ج).

در آزمایش STS-4 در نمونه مسلح، میلگرد کاشت شده به عمق ۱۵ سانتی‌متر با فاصله ۱۰ سانتی‌متر (۶ برابر قطر میلگرد) از لبه، مشابه نمونه غیرمسلح مود شکل مخروط ناقص مشاهده شد (شکل ۱۰-ت). با توجه به فاصله ۱۰ سانتی‌متری میلگرد کاشت شده از لبه، مشاهده می‌شود مخروط اصلی با زاویه‌ای بیش از ۴۵ درجه تشکیل شده است و اثرات آن تا فاصله ۲ برابر فاصله کاشت از لبه مشاهده می‌شود. در آزمایش STS-5 با



شکل ۱۰. نمونه های کاشت شده در بتن در پایان آزمایش برش

Fig. 10. Post-installed anchors at the end of shear test

نتایج مربوط به حداکثر ظرفیت اسمی و مود شکست آزمایش های برش در جدول ۲ ارائه شده است. همانطور که از نتایج مشخص است، با وجود این که فواصل گروه میلگرد بر اساس آیین نامه بتن آمریکا [۱۳] در ناحیه تأثیر یکدیگر قرار دارند، ولی حداکثر ظرفیت برش اسمی گروه میلگرد دوتایی نسبت به تکی در هر دو نمونه مسلح و غیرمسلح حدود دو برابر می باشد که نشان می دهد فواصل تأثیر ارائه شده در آیین نامه محافظه کارانه است. به طوری که در نمونه غیرمسلح ظرفیت برش اسمی در حالت تکی برابر با ۳۸/۵ کیلونیوتن و در حالت گروهی ۷۲/۸ کیلونیوتن می باشد. این مورد در نمونه مسلح نیز به ترتیب ۵۸/۲ و ۱۱۷/۸ کیلونیوتن می باشد.

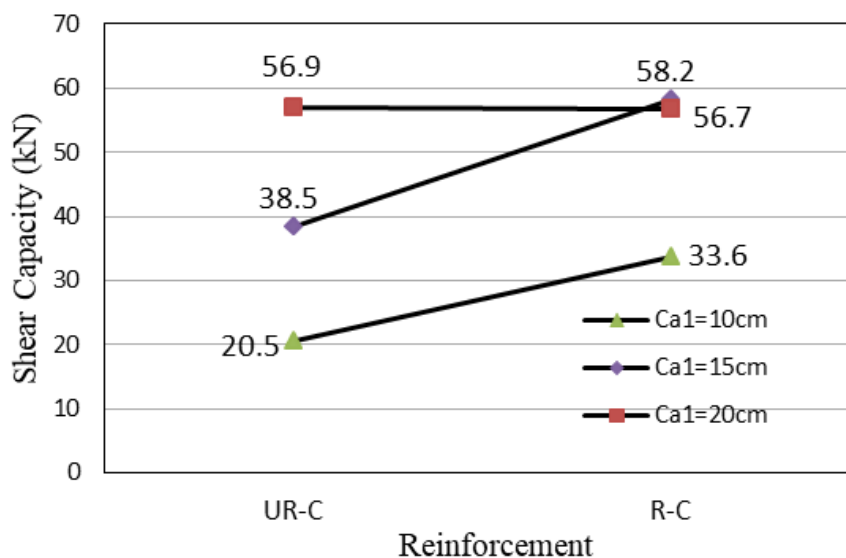
از طرفی با توجه به شکل ۱۱ مشاهده می شود در فاصله ۱۰ و ۱۵ سانتی متری (۶ و ۱۰ برابر قطر میلگرد) از لبه، ظرفیت برشی نمونه مسلح نسبت به نمونه غیرمسلح حدود ۵۰ درصد افزایش یافته است. ولی در نمونه کاشت شده در فاصله ۲۰ سانتی متری از لبه (۱۵ برابر قطر میلگرد)، مسلح و یا غیرمسلح بودن در ظرفیت نهایی تأثیر چندانی ندارد. دلیل این موضوع حاکم بودن مود شکست گسیختگی برشی میلگرد در هر دو حالت می باشد. شایان ذکر است آرماتورهای داخل نمونه ی بتنی از عوامل تأثیرگذار بر حاکم شدن مود گسیختگی برشی میلگرد می باشد.

آزمایش های STM-2 و STM-1 مربوط به کاشت دو میلگرد به فاصله ۱۵ سانتی متر از لبه و ۳۰ سانتی متر از یکدیگر (دو برابر فاصله از لبه) به عمق ۱۵ سانتی متر به ترتیب در نمونه بتنی غیرمسلح و مسلح هستند. در این دو آزمایش هر دو میلگرد به صورت همزمان تحت بار برشی قرار گرفتند تا تأثیر کاشت گروهی بر رفتار میلگردها مورد بررسی قرار گیرد. در نمونه غیرمسلح (شکل ۱۰-چ) آزمایش تا تشکیل مود شکست مخروط ناقص بتن ادامه پیدا کرد و دو میلگرد به صورت گروهی عمل کرده و رفتار مستقل از هم نشان ندادند و زاویه ی مخروط تشکیل شده حدود ۴۵ درجه بود. از طرفی عمق اصلی شکست ایجاد شده برابر با ۲۰ سانتی متر می باشد که نسبت به آزمایش های تکی عمیق تر است. در نمونه مسلح (شکل ۱۰-ح) جلوی هر دو میلگرد مود شکست خرد شدن بتن تشکیل شد. پس از آن ترک بین دو میلگرد و ترک بین میلگرد و لبه نمونه گسترش پیدا کرد تا زمانی که در یکی از میلگردها مود شکست مخروطی به طور کامل تشکیل شود. از طرفی بین دو میلگرد نیز ترک عمیقی تشکیل شده است که نشانگر رفتار برشی گروهی دو میلگرد می باشد. زاویه ی مخروط تشکیل شده بیشتر از ۴۵ درجه می باشد و عمق اصلی شکست ایجاد شده بین ۱۳ تا ۲۲ سانتی متر می باشد که نسبت به آزمایش های تکی عمیق تر است.

جدول ۲. حداکثر ظرفیت اسمی آزمایش های برش و مود شکست مربوطه

Table 2. Maximum nominal strength of shear tests and their failure modes

| نام آزمایش | حداکثر ظرفیت اسمی (kN) | مود شکست |
|------------|------------------------|----------------------------------|
| STS-1 | ۲۰/۵ | مخروط ناقص |
| STS-2 | ۳۸/۵ | مخروط ناقص |
| STS-3 | ۵۶/۹ | خرد شدن بتن |
| STS-4 | ۳۳/۶ | مخروط ناقص |
| STS-5 | ۵۸/۲ | مخروطی بتن و گسیختگی برشی میلگرد |
| STS-6 | ۵۶/۷ | گسیختگی برشی میلگرد |
| STM-1 | ۷۲/۸ | مخروط ناقص |
| STM-2 | ۱۱۷/۸ | مخروطی بتن و گسیختگی برشی میلگرد |

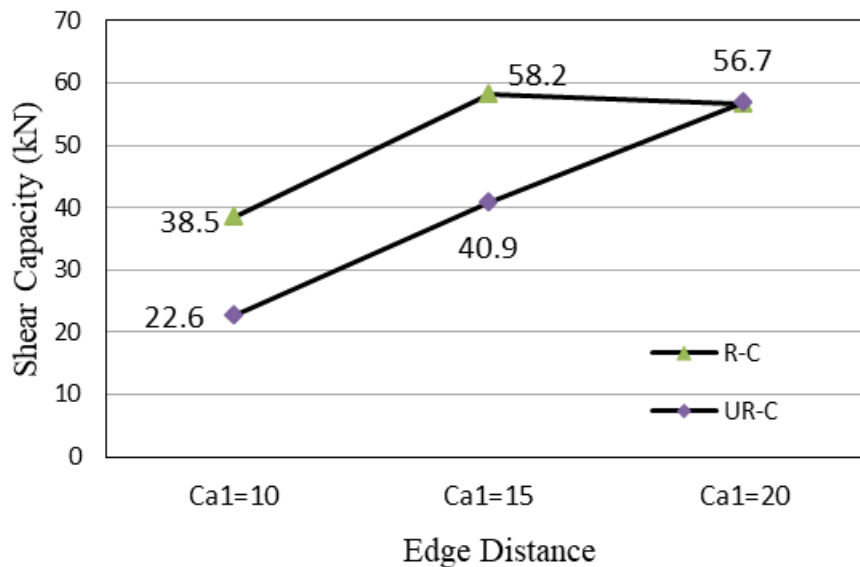


شکل ۱۱. تأثیر آرماتورگذاری بر روی ظرفیت برشی میلگرد کاشت شده

Fig. 11. Effect of reinforcement on shear strength of post-installed anch

برابر قطر میلگرد) تا ۱۵ سانتی متر (۱۰ برابر قطر میلگرد) از لبه نمونه رخ می دهد. ولی پس از فاصله ۱۵ سانتی متر از لبه، به دلیل حاکم شدن مود گسیختگی برشی میلگرد در فاصله ۱۵ سانتی متر، ظرفیت برشی تغییر نکرده است.

در شکل ۱۲ نیز مشاهده می گردد که با افزایش فاصله کاشت میلگرد از لبه نمونه غیرمسلح از ۱۰ سانتی متر (۶ برابر قطر میلگرد) به ۲۰ سانتی متر (۱۵ برابر قطر میلگرد)، ظرفیت شکست مخروطی بتن به صورت خطی افزایش می یابد. در نمونه مسلح نیز این اتفاق در فاصله ۱۰ سانتی متر (۶



شکل ۱۲. تأثیر فاصله از لبه نمونه بتنی بر روی ظرفیت برشی میلگرد کاشت شده

Fig. 12. Edge distance effect on shear strength of post-installed anchors

$$N_{ag} = \frac{A_{Na}}{A_{Nao}} \Psi_{ec,Na} \Psi_{ed,Na} \Psi_{cp,Na} N_{ba} \quad (2)$$

در روابط فوق A_{Nao} مساحت ایده‌آل گوه بتن در شرایط ایده‌آل (با فاصله‌ی کافی از لبه‌های آزاد)، A_{Na} مساحت موثر گوه بتن در شرایط موجود، و $\Psi_{ec,Na}$ ، $\Psi_{cp,Na}$ ، $\Psi_{ed,Na}$ و N_{ba} به ترتیب ضریب تأثیر فاصله تا لبه‌ی آزاد، ضریب گسیختگی چسب و ترک‌خوردگی بتن، ضریب اثرات خروج از مرکزیت و مقاومت چسبندگی می‌باشند.

برای محاسبه‌ی ظرفیت کششی میلگردهای کاشت شده تکی و گروهی در مود شکست مخروط ناقص بتنی به ترتیب روابط ۳ و ۴ ارائه شده است. ضریب اطمینان طراحی در این حالت نیز برابر ۰/۶۵ می‌باشد.

$$N_{cb} = \frac{A_{Nc}}{A_{Nco}} \Psi_{ed,N} \Psi_{c,N} \Psi_{cp,N} N_b \quad (3)$$

$$N_{cbg} = \frac{A_{Nc}}{A_{Nco}} \Psi_{ec,N} \Psi_{ed,N} \Psi_{c,N} \Psi_{cp,N} N_b \quad (4)$$

۴- مقایسه نتایج با ضوابط آیین‌نامه ۸۱۳-۹۱ ICA

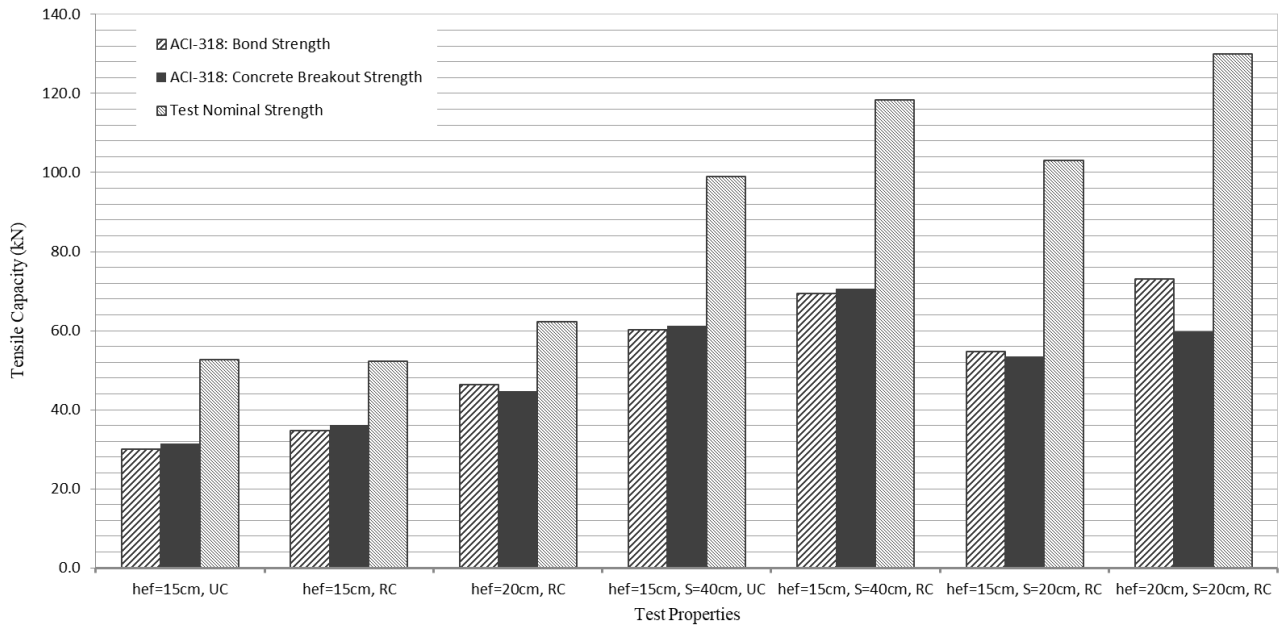
با توجه به اهمیت کاربردی نتایج، در ادامه به مقایسه ظرفیت‌های به دست آمده از آزمایش‌ها با ظرفیت‌های توصیه شده توسط آیین‌نامه‌ی ACI 318-19 [۱۳] می‌پردازیم. شایان ذکر است که از تقسیم نتایج اسمی آزمایشگاهی بر مقادیر طراحی آیین‌نامه‌ای، ضریب اطمینان طراحی تعیین شده است.

۴-۱- روابط آیین‌نامه ACI 19-318 برای ظرفیت کاشت چسبی

در آیین‌نامه ACI 318-19 روابط جداگانه‌ای برای مودهای مختلف شکست و برای بارهای کششی و برشی ارائه شده است. در این بخش فقط روابط استفاده شده در متن مرور می‌شود.

برای مود شکست پیوستگی تحت بار کششی، ظرفیت اسمی میلگردهای تکی و گروهی، به ترتیب روابط ۱ و ۲ می‌باشد. ضریب اطمینان طراحی در این حالت برابر ۰/۶۵ می‌باشد.

$$N_a = \frac{A_{Na}}{A_{Nao}} \Psi_{ed,Na} \Psi_{cp,Na} N_{ba} \quad (1)$$



شکل ۱۳. مقایسه ی ظرفیت-اسمی آزمایش های کشش میلگرد با روابط آیین نامه ACI 19-318 [۱۳]

Fig. 13. Measured and predicted (by ACI 318-19) tensile capacities of adhesive anchors

نمونه بتنی و ضریب اثرات خروج از محوریت بار برشی و V_b مقاومت پایهی مخروط بتنی برای یک میلگرد تحت بار برشی می باشد. برای برآورد ظرفیت برشی میلگردهای کاشت شده در مود شکست گسیختگی برشی میلگرد رابطه ۷ ارائه شده است. ضریب اطمینان طراحی در این حالت برابر $0/65$ می باشد.

$$V_{sa} = 0.6A_{se,y}f_{uta} \quad (7)$$

در رابطه فوق $A_{se,y}$ مقطع موثر میلگرد و f_{uta} تنش نهایی فولاد می باشد.

۴-۲- آزمایش های کشش

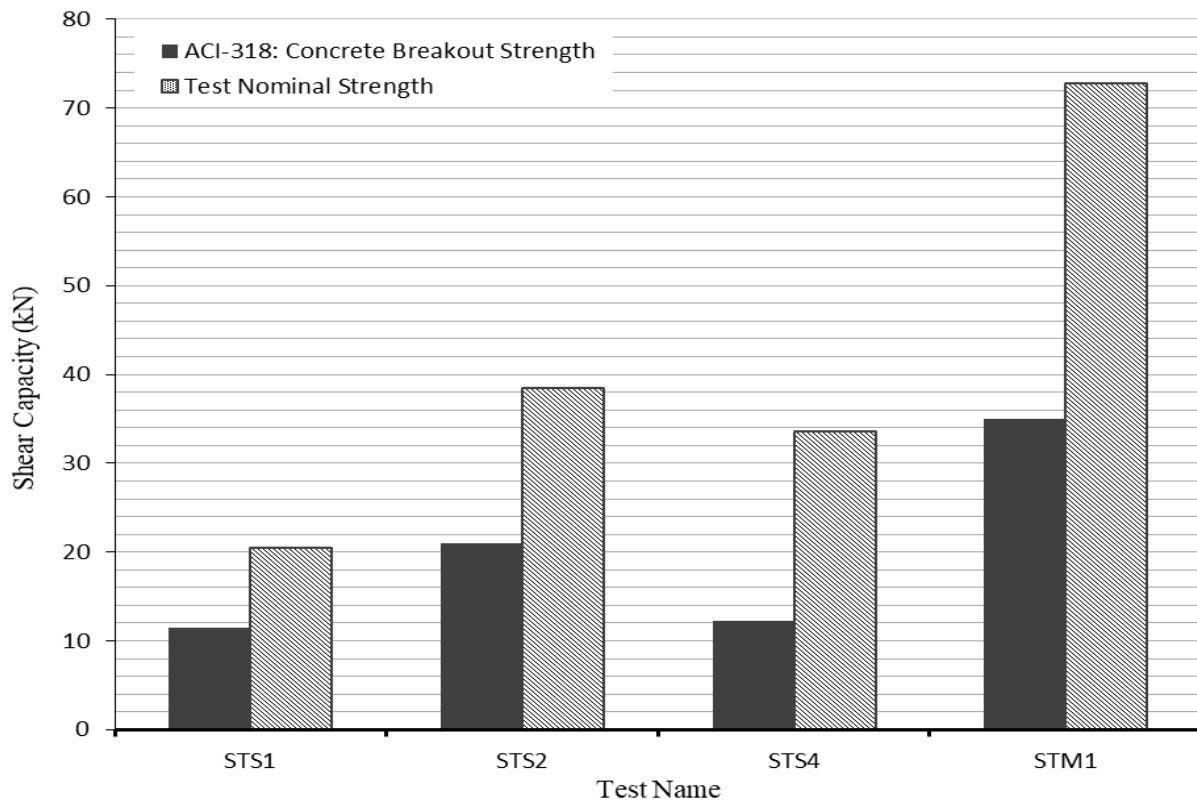
در شکل ۱۳ ظرفیت های اسمی به دست آمده از آزمایش های کشش با ظرفیت های طراحی آیین نامه [۱۳] تحت اثر بارهای کششی مقایسه شده است. در محور افقی این شکل h_{ef} عمق موثر کاشت، s فاصله آرماتورهای کاشت گروهی و UC و RC به ترتیب نشانگر نمونه بتنی غیرمسلح و مسلح

در روابط فوق $\Psi_{c,N}$ ضریب ترک خوردگی نمونه بتنی و N_b مقاومت پایهی مخروط بتنی برای یک میلگرد تحت بار کششی می باشند. برای ظرفیت برشی میلگردهای کاشت شده تکی و گروهی در مود شکست مخروط ناقص بتنی به ترتیب روابط ۵ و ۶ ارائه شده است. ضریب اطمینان طراحی در این حالت برابر $0/7$ می باشد.

$$V_{cb} = \frac{A_{Vc}}{A_{Vco}} \Psi_{ed,y} \Psi_{c,y} \Psi_{h,y} V_b \quad (5)$$

$$V_{cbg} = \frac{A_{Vc}}{A_{Vco}} \Psi_{ec,y} \Psi_{ed,y} \Psi_{c,y} \Psi_{h,y} V_b \quad (6)$$

در روابط فوق $\Psi_{ed,y}$ ، $\Psi_{c,y}$ ، $\Psi_{h,y}$ و $\Psi_{ec,y}$ به ترتیب ضریب تأثیر فاصله تا لبه ی آزاد، ضریب ترک خوردگی نمونه بتنی، ضریب عمق



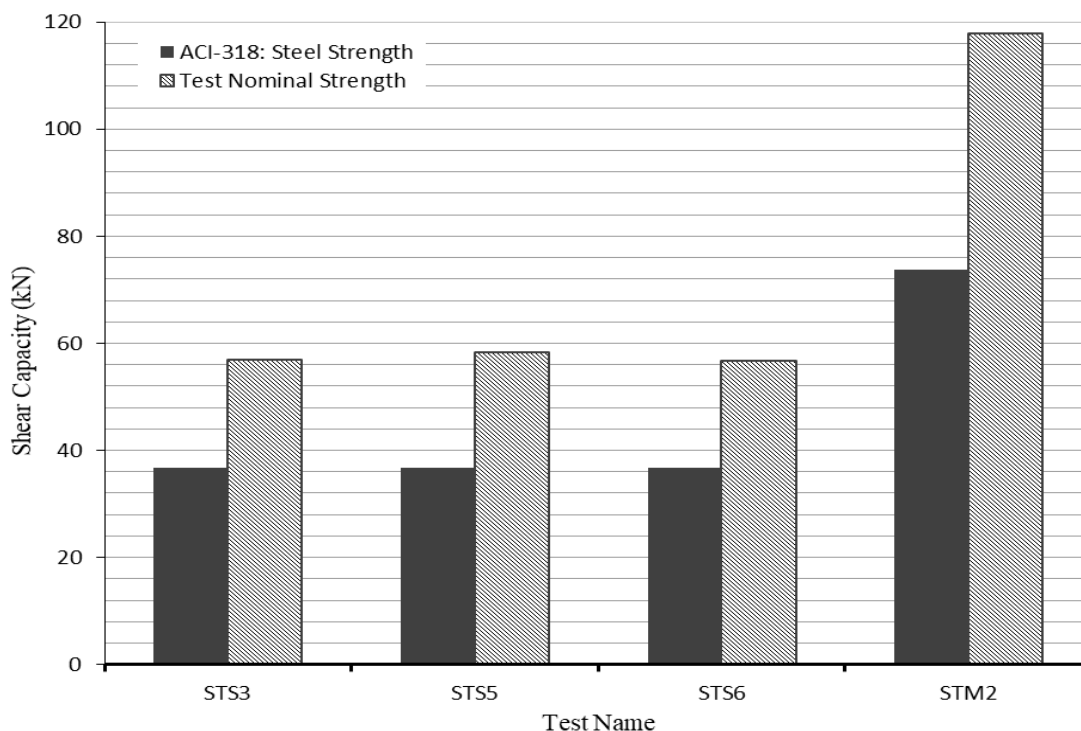
شکل ۱۴. مقایسه ی ظرفیت اسمی آزمایش های برش میلگرد با مود شکست مخروطی بتن با روابط ACI 19-318 [۱۳]

Fig.14. Measured and predicted (by ACI 318-19) shear capacities of adhesive anchors in concrete cone failure mode

۴-۳- آزمایش های برش

در شکل های ۱۴ و ۱۵ ظرفیت های اسمی به دست آمده از آزمایش های برش با ظرفیت های طراحی تخمین زده شده توسط آیین نامه ی بتن آمریکا مقایسه شده است. در شکل ۱۴ هر دسته دوتایی از نمودارهای میله ای به ترتیب از چپ به راست نشانگر ظرفیت طراحی مخروط ناقص بتن در برش و ظرفیت اسمی آزمایش های برشی که مود شکست غالب مخروط ناقص بتن بود می باشد. در شکل ۱۵ نیز هر دسته دوتایی از نمودارهای میله ای به ترتیب از چپ به راست نشانگر ظرفیت طراحی گسیختگی برشی میلگرد و ظرفیت اسمی آزمایش های برشی که مود شکست گسیختگی برشی رخ داده است، می باشد. در شکل ۱۴ مشاهده می شود نتایج به دست آمده از آیین نامه برای مود شکست مخروطی بتن و مقادیر به دست آمده از آزمایش ها اختلاف نسبتاً زیادی دارند. این بدان معناست که آیین نامه ضریب اطمینان بزرگ تری را در مود برش نسبت به کشش اعمال کرده است. البته عدم قطعیت بالاتر رفتار برشی نسبت به کشش میلگرد این اختلاف را توجیه می کند. از طرفی با توجه

هستند. در این شکل هر دسته سه تایی از نمودارهای میله ای به ترتیب از چپ به راست نشانگر ظرفیت طراحی پیوستگی، ظرفیت طراحی مخروط ناقص بتن و ظرفیت اسمی آزمایش می باشد. اختلاف نتایج آزمایش با توصیه آیین نامه در نمونه های تکی (سه نمودار اول) نشان می دهد که ضریب اطمینان آیین نامه خیلی بزرگ نیست گر چه از یک بیشتر است. از طرفی با مقایسه نتایج آزمایش های گروه میلگرد و توصیه های آیین نامه (چهار نمودار آخر) مشاهده می شود ضریب اطمینان بزرگ تری برای طراحی گروهی نسبت به تکی به کار رفته است. این واقعیت نشان می دهد آیین نامه در کاشت های گروهی سخت گیرانه تر عمل کرده و ظرفیت های کم تری نسبت به کاشت تکی پیش بینی می کند. در مجموع، از بررسی کلی نسبت ظرفیت های اسمی آزمایش ها به توصیه های آیین نامه، حداقل ضریب اطمینان حدود ۱/۵ برای کشش به دست می آید. این عدد بیانگر حداقل ضریب اطمینانی است که کاربرد آیین نامه مذکور برای طراحی کاشت چسبی در شرایط نسبتاً خوب کارگاهی در ایران به همراه خواهد داشت.



شکل ۱۵. مقایسه ی ظرفیت اسمی آزمایش های برش میلگرد با مود شکست گسیختگی برشی میلگرد با روابط ACI 19-318 [۱۳]

Fig. 15. Measured and predicted (by ACI 318-19) shear capacities of adhesive anchors in steel failure mode

میزان ترک‌های اطراف میلگرد کاشت شده تحت بار کششی مشاهده شد که نشانگر تأثیر آن در جلوگیری از لغزش بین چسب و بتن و راهکار مناسبی برای استفاده از حداکثر ظرفیت آرماتور کاشت می‌باشد.

- مقاومت پیوستگی اولیه چسب مستقل از مسلح و یا غیرمسلح بودن بستر کاشت میلگرد می‌باشد.

- با افزایش عمق کاشت از ۱۵ سانتی‌متر (۱۰ برابر قطر میلگرد) به ۲۰ سانتی‌متر (۱۵ برابر قطر میلگرد) ظرفیت از مقدار ۵۲/۳ کیلونیوتن به ۶۲/۳ کیلونیوتن می‌رسد و حدود ۲۰ درصد زیاد می‌شود.

- در کاشت‌های گروه میلگرد با کم کردن فاصله بین میلگردهای کاشت از ۴۰ سانتی‌متر (حدود ۳ برابر عمق کاشت) به ۲۰ سانتی‌متر (حدود ۱/۵ برابر عمق کاشت)، ظرفیت پیوستگی بین چسب و بتن از ۱۱۸/۳ به ۱۰۳ کیلونیوتن کاهش پیدا می‌کند.

- تأثیر کاشت گروهی در نمونه مسلح تحت بار برشی بیشتر از نمونه غیرمسلح مشاهده شد. دلیل این موضوع را می‌توان به عملکرد یکپارچه نمونه مسلح دانست که نیروی برشی وارد به نمونه در آن گسترش پیدا می‌کند و به صورت موضعی بار به سیستم وارد نمی‌شود.

به افزایش اختلاف بین نتایج آزمایش و مقادیر آیین‌نامه در آزمایش‌های گروه میلگرد (STM-1) نسبت به آزمایش‌های میلگرد تکی، بار دیگر و همانند کشش، در برش نیز آیین‌نامه در کاشت‌های گروهی سخت‌گیرانه‌تر عمل کرده و ظرفیت‌های پایین‌تری را پیش‌بینی می‌کند. از بررسی کلی نتایج، می‌توان گفت آیین‌نامه حداقل ضریب اطمینان حدود ۲ برای برش در نظر گرفته است. این از مقدار به دست آمده برای کشش بزرگ‌تر است که قابل انتظار است. لازم به ذکر است که این نتایج مربوط به شرایط کارگاهی نسبتاً خوب در ایران است و محدود به گستره نمونه‌های مورد مطالعه می‌باشد.

۵- نتیجه گیری

در این تحقیق رفتار میلگردهای کاشته شده در بتن به وسیله چسب اپوکسی تحت بارهای کششی و برشی مورد آزمایش قرار گرفت و مودهای شکست و ظرفیت کششی و برشی آن‌ها بررسی شد. در ادامه خلاصه‌ای از نتایج به دست آمده از این تحقیق ارائه شده است.

- با افزایش عمق کاشت میلگرد از ۱۵ سانتی‌متر (۱۰ برابر قطر میلگرد) به ۲۰ سانتی‌متر (۱۵ برابر قطر میلگرد) کاهش چشمگیری در

- [8] A. Çolak, Parametric study of factors affecting the pull-out strength of steel rods bonded into precast concrete panels, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 21(6) (2001) 487-493.
- [9] S. Tastani, S. Pantazopoulou, Experimental evaluation of the direct tension-pullout bond test, *Bond in Concrete—from research to standards*, (12) (2002).
- [10] M. Gesoglu, T. Özturan, M. Özel, E. Güneyisi, Tensile behavior of post-installed anchors in plain and steel fiber-reinforced normal-and high-strength concretes, *ACI Structural Journal*, 102(2) (2005) 224.
- [11] R. Eligehausen, R.A. Cook, Behavior and design of adhesive bonded anchors, *ACI Structural Journal*, 103(6) (2006) 822.
- [12] S. Epackachi, O. Esmaili, S.R. Mirghaderi, A.A.T. Behbahani, Behavior of adhesive bonded anchors under tension and shear loads, *Journal of Constructional Steel Research*, 114 (2015) 269-280.
- [13] A.C. 318, Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-19[and] Commentary on Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318R-19), 2019.
- [14] D. Wang, D. Wu, S. He, J. Zhou, C. Ouyang, Behavior of post-installed large-diameter anchors in concrete foundations, *Construction and Building Materials*, 95 (2015) 124-132.
- [15] Y. Takase, Testing and modeling of dowel action for a post-installed anchor subjected to combined shear force and tensile force, *Engineering Structures*, 195 (2019) 551-558.
- [16] B.A. Tayeh, S. Shihada, M.O. Yusuf, Pull-out behavior of post installed rebar connections using chemical adhesives and cement based binders, *Journal of King Saud University-Engineering Sciences*, 31(4) (2019) 332-339.
- [17] S.Y.M. Siamakani, P. Jiradilok, K. Nagai, R. Sahamitmongkol, Discrete mesoscale analysis of adhesive anchors under tensile load taking into account post-installed reinforcement, *Construction and Building*
- در آزمایش‌های گروهی به دلیل وارد آمدن بار بیشتر به نمونه، عمق ترک‌های ایجاد شده بسیار بیشتر از آزمایشات تکی بود که اهمیت تأثیر گروهی میلگردهای تحت بار برشی بر عملکرد آن‌ها را نشان می‌دهد.
 - روابط موجود در آیین‌نامه ACI 318-19 برای طراحی کششی و برشی میلگردهای کاشت شده در بتن، بر پایه آزمایش‌های انجام گرفته، دارای حاشیه اطمینان مناسبی (لااقل ۱/۵ برای کشش و ۲ برای برش) می‌باشد.
- ### تشکر و قدردانی
- نویسندگان تشکر صمیمانه خود را از کارشناسان محترم آزمایشگاه سازه دانشگاه تهران، آقایان مهندس زارع و مهندس رحمانی، به خاطر همکاری‌های صمیمانه ایشان در طول مدت انجام پژوهش ابراز می‌کنند.
- ### منابع
- [1] J.G. Ollgaard, R.G. Slutter, J.W. Fisher, Shear strength of stud connectors in lightweight and normal weight concrete, *AISC Eng'g Jr.*, April 1971 (71-10), (1971).
- [2] R.A. Cook, Behavior of chemically bonded anchors, *Journal of Structural Engineering*, 119(9) (1993) 2744-2762.
- [3] R. Eligehausen, T. Balogh, Behavior of fasteners loaded in tension in cracked reinforced concrete, *Structural Journal*, 92(3) (1995) 365-379.
- [4] W. Fuchs, R. Eligehausen, J.E. Breen, Concrete capacity design (CCD) approach for fastening to concrete, *Structural Journal*, 92(1) (1995) 73-94.
- [5] M. McVay, R.A. Cook, K. Krishnamurthy, Pullout simulation of postinstalled chemically bonded anchors, *Journal of Structural Engineering*, 122(9) (1996) 1016-1024.
- [6] R.A. Cook, J. Kunz, W. Fuchs, R.C. Konz, Behavior and design of single adhesive anchors under tensile load in uncracked concrete, *Structural Journal*, 95(1) (1998) 9-26.
- [7] B. Lehr, R. Eligehausen, Centric tensile tests of quadruple fastenings with bonded anchors, *Research report, Institut für Werkstoffe im Bauwesen*, 1998.

- American Concrete Institute, 1991.
- [21] ACI, Evaluating the Performance of Post-installed Mechanical Anchors in Concrete (ACI 355.2-01) and Commentary (ACI 355.2 R-01): An ACI Standard, in, American Concrete Institute, 2002.
- [22] ACI, Acceptance criteria for qualification of post-installed adhesive anchors in concrete (ACI 355.4-11) and commentary, in, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, 2011.
- Materials, 262 (2020) 120778.
- [18] K.S. Ahmed, M. Shahjalal, T.A. Siddique, A.K. Keng, Bond strength of post-installed high strength deformed rebar in concrete, Case Studies in Construction Materials, (2021) e00581.
- [19] A. Committee, Code Requirements for Nuclear Safety Related Concrete Structures (ACI 349-85)(Revised 1990)(Reproved), ACI Jour, 82(8) (1985).
- [20] ACI, State-of-Art Report on Anchorage to Concrete, in,

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

K. Entezari, M. S. Marefat, A. Hosseini, Experimental investigation of post-installed adhesive anchors in concrete under tension and shear loads, Amirkabir J. Civil Eng., 54(6) (2022) 2303-2320.

DOI: [10.22060/ceej.2021.19838.7275](https://doi.org/10.22060/ceej.2021.19838.7275)



