

ارزیابی پارامترهای موثر بر پیوستگی میلگرد فاقد طول مهاري کافي در آزمایش بیرون کشیدن میلگرد از بتن

فرهنگ فرحبد^{۱*}، امیر شهبابی فراهانی^۲

۱. دانشیار بخش سازه، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی

۲. دانشجوی دوره دکترا عمران-زلزله، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی

f.farahbod@bhrc.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۳/۲۵

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۶/۱۸

چکیده

عملکرد میلگرد مدفون در داخل بتن، همواره یکی از موضوعات پیچیده و مهم در سازه‌های بتن‌آرمه به شمار می‌رود. یکی از آزمایش‌های رایج، در زمینه برآورد رفتار میلگرد در بتن، آزمایش بیرون‌کشیدن میلگرد (Pullout Test) است، ولی با وجود تحقیقات متعدد در این زمینه کاستی‌هایی به چشم می‌خورد. در این پژوهش، پنج آزمایش بیرون کشیدن میلگرد شامل چهار نمونه با بتن محصور شده و یک نمونه با بتن غیر محصور، با در نظر گرفتن سه قطر مختلف میلگرد انجام شد. به کمک نتایج به دست آمده و نتایج پژوهش‌های قبلی، برخی از پارامترهای مهم در زمینه رفتار پیوستگی و لغزش میلگرد، از جمله اثر مقاومت بتن، قطر میلگرد، فشاری یا کششی بودن نیروی وارد شده و محصورشدگی بررسی و روابطی با دقت مناسب برای آن‌ها ارائه شد تا بتوان با استفاده از این روابط، نتایج موجود و در دسترس را به حالت مورد نظر تعمیم داد. برای درستی آزمایشی و افزایش دامنه نتایج، از سه تحقیق معتبر دیگر در این زمینه استفاده شده است که دقت روابط و نتایج به دست آمده را تایید می‌نمایند. روابط حاصل از این تحقیق نشان داد که تنش پیوستگی، با افزایش ۵۰ درصدی مقاومت فشاری بتن، تا حدود ۲۰ درصد افزایش می‌یابد. به علاوه، بر اساس روابط ارائه شده، با تغییر قطر میلگرد از ۲۰ به ۲۲ و ۲۵ میلی‌متر، برای یک مقاومت فشاری ثابت، تنش پیوستگی به ترتیب به میزان ۴/۳ و ۱۰/۶ درصد کاهش می‌یابد. همچنین عدم محصورشدگی نمونه، تنش پیوستگی حداکثر را تا ۴۰ درصد تنش حالت محصور شده و لغزش متناظر با تنش حداکثر را بین ۱۵ تا ۳۰ درصد کاهش می‌دهد. فشاری بودن نیروی محوری میلگرد نیز در مقایسه با نیروی کششی، تا حدود ۱۰ درصد تنش پیوستگی را افزایش می‌دهد.

واژگان کلیدی: پیوستگی بتن به فولاد، لغزش میلگرد، بتن محصور شده، بیرون کشیدن میلگرد، نمودار تنش پیوستگی-لغزش.

۱- مقدمه

رفتار پیوستگی بین بتن و میلگرد یکی از پارامترهای مهم در بارهای استاتیکی و دینامیکی یک سازه بتنی به شمار می‌رود. هم‌سازی کرنش و تغییر شکل‌ها در مقطع بتن‌آرمه و برقراری اصل برنولی، با لحاظ پیوستگی کامل میان میلگرد و بتن استوار است؛ اما فرض اینکه پیوستگی کاملی بین این دو وجود دارد، باعث خواهد شد سختی سازه به طور غیر واقعی زیاد شود و به همان تناسب تغییر مکان کلی و جزئی سازه و اجزا کاهش یابد. تاکنون مدل‌های متفاوتی برای پیوستگی لغزش میلگرد ارایه شده است. لازم به ذکر است که در تمامی این مطالعات، میلگردهای فولادی طول مهارتی کافی نداشته‌اند و پدیده لغزش به وقوع پیوسته است. در اکثر این مدل‌ها روابطی برای تنش پیوستگی و لغزش میلگرد در داخل بتن ارایه شده است. در این روابط معمولاً مقاومت فشاری بتن و مقدار لغزش تنها پارامترهای اثرگذار هستند.

الینگوسن و همکاران (۱۹۸۳) با انجام صد و بیست و پنج تست بیرون کشیدن میلگرد رابطه‌ای ارایه نمودند [1]. ایشان در ادامه طی یک گزارش، با ارایه مشخصات آزمایش‌ها و نتایج به جزییات مدل مطرح شده پرداختند. این پژوهشگران از میلگردهایی با قطر ۲۵ میلی‌متر (و در یک مورد از قطرهای ۳۲ و ۱۹ میلی‌متر) استفاده نمودند. همچنین طول مهارتی نمونه‌ها به اندازه کافی نبوده است [2]. شیما و همکاران (۱۹۸۷) با انجام بیست و یک آزمایش مؤلفه‌های جدیدی از جمله استفاده از میلگرد آلومینیومی و اثر فاصله انتهای میلگرد تا سطح بتن را مورد مطالعه قرار دادند. همچنین از بتن‌های با مقاومت‌های متفاوت، در نمونه‌های خود استفاده کردند. طول مهارتی میلگرد در نمونه‌ها کافی نبوده است [3]. آیین‌نامه سب-فیپ (۱۹۹۰) با بهره‌گیری از مدل الینگوسن مدلی برای رفتار پیوستگی لغزش ارایه داد که بسیار مورد توجه قرار گرفت. در این مدل چهار بخش شامل شاخه صعودی، تنش ثابت حداکثر، شاخه نزولی و تنش پس‌ماند لحاظ شده است. جزییات این تحقیق در ادامه ذکر شده است [4]. ساچی‌اوگلو و همکاران (۱۹۹۲) ضمن بررسی لغزش میلگرد در بتن در حالت بار یکنواخت، تنش و کرنش در میلگرد را در مقاطع مختلف بررسی نمودند. در این تحقیق

میلگرد آج‌دار مستقیم و خم شده بررسی شدند. چهار ناحیه در هنگام لغزش میلگرد بررسی و مشاهده شد که شامل مخروط بیرون کشیدگی، ناحیه سخت‌شدگی میلگرد، ناحیه جاری شدن میلگرد و محدوده الاستیک آن است. برای هر ناحیه روابطی ارایه شده و طول هر کدام از این نواحی تخمین زده شده است. همه نتایج این پژوهشگران برای میلگردهای با طول مهارتی کافی معتبر است [5]. هسکت و همکاران (۲۰۰۷) ضمن بررسی تحلیلی روابط قبلی رابطه جدید و ساده شده‌ای برای پیوستگی میلگرد در مقابل لغزش آن ارایه کردند. آن‌ها با کاهش پارامترهای موثر و آوردن نتایج برخی پژوهش‌های قبلی، رابطه خود را ساده‌تر و دقیق‌تر بیان کردند [6]. والکند و پارا (۲۰۰۹) در دوازده آزمایش، پیوستگی و لغزش میلگرد را در بتن‌های معمولی و خود متراکم بررسی و نتایج را ارایه کردند. میلگردهای استفاده شده ۱۲ و ۱۶ میلی‌متر و طول مهارتی ناکافی بوده است. ایشان به این نتیجه رسیدند که در بتن‌های خود متراکم با مقاومت کمتر از پنجاه مگاپاسکال، تنش پیوستگی حداکثر، بیش از بتن‌های معمولی است. در مقاومت‌های بالاتر این اختلاف کمتر می‌شود [7]. فیپ (۲۰۱۰) رابطه ارایه شده در نسخه قبلی آن را اندکی اصلاح و ارایه نمود. این رابطه همچنان بر پایه تحقیقات الینگوسن و همکاران است و بخش‌های مختلف آن، تغییر بنیادی نکرده است و تنها ضرایب و موارد جزئی تغییر کرده است [8]. ژو و همکاران (۲۰۱۷) اثر کرنش فولاد را در مدل لغزش خود لحاظ کردند. آن‌ها پیوستگی پیش و پس از جاری شدن میلگرد با طول مهارتی کافی را بررسی و به نمودارهایی دست پیدا کردند. با توجه به نتایج به دست آمده، بیان کردند که تنش پیوستگی در دو حالت ذکر شده، متناسب با مقاومت فشاری بتن، با توان دو سوم است [9].

همانگونه که از بررسی مقالات ذکر شده و نمودارهای تنش پیوستگی لغزش آن‌ها بر می‌آید، تلاش پژوهشگران بر این بوده است که روابط و نمودارهایی را ارایه کنند که برای مقاصد مهندسی مناسب و ساده باشند؛ در نتیجه این امکان وجود داشته باشد که با کمترین اطلاعات بتوان روابط میلگرد و بتن را به دست آورد. با وجود مزایای دیدگاه فوق، این ساده‌سازی باعث از دست رفتن دقت در محاسبات شده و اینکه اثر برخی

۲-۲- نمودار هستک و همکاران

هستک و همکاران با ارایه نموداری بر مبنای فیپ ۹۰، برخی از پارامترهای مطرح را ساده سازی و ارایه نمودند. شکل ۲ بیانگر مدل ارایه شده توسط ایشان است. از سویی این پژوهشگران مبنای کار خویش را بر اساس بتن محصور شده قرار دادند. در نمودار فوق، لغزش مربوط به تنش حداکثر (δ_1) ۱/۵ میلی متر، لغزش حداکثر ۱۵ میلی متر و تنش حداکثر $2.5\sqrt{fc}$ فرض شده است [6]. رابطه قسمت اول نمودار به شکل زیر و بخش دوم هم خطی است. در این روابط، τ_b (N/mm^2) تنش پیوستگی، τ_{bmax} تنش پیوستگی حداکثر و δ (mm) لغزش است:

$$\tau = \tau_{max}(\delta/\delta_1)^{0.4} \quad (5)$$

شکل ۱ رابطه تحلیلی تنش پیوستگی لغزش (فیپ ۹۰ و فیپ ۲۰۱۰) [4] [8]

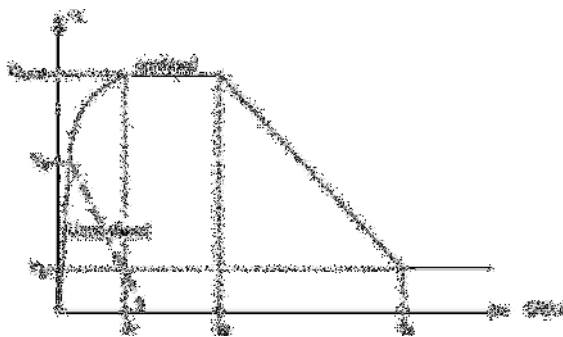


Fig. 1. Analytical bond stress-slip relationship (Fip90, Fip2010) [4] [8]

شکل ۲. نمودار تنش پیوستگی لغزش هستک و همکاران [6]

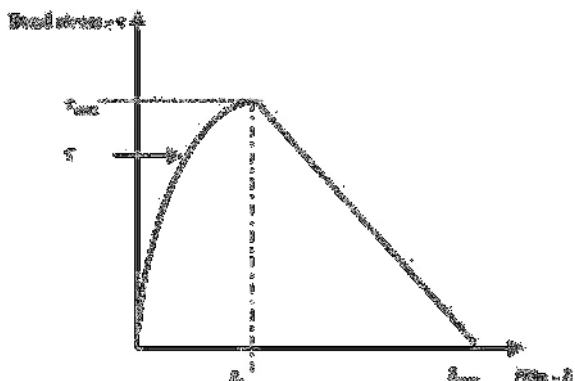


Fig. 2. Hasket bond stress - slip figure [6]

۳-۲- نمودار فیپ ۲۰۱۰

فیپ در نسخه ۲۰۱۰ با تغییرات اندکی در مقادیر تنش و لغزش‌ها رابطه و نمودار خود را ارایه نمود [8].

مؤلفه‌های مهم دیده نشود. برخی از مهمترین پارامترها که نیاز به بررسی بیشتر و دقیق‌تر دارند عبارتند از اثر مقاومت فشاری بتن، قطر میلگرد، اثر محصورشدگی بتن و فشاری یا کششی بودن نیروی وارده بر میلگرد مدفون در بتن. همچنین نیاز به روابطی وجود دارد، که بتوان نتایج به دست آمده با خواص خود را به حالت‌های دیگری (مانند مقاومت بتن یا قطر متفاوتی) گسترش داد. به علاوه برخی از شرایط اولیه آزمایش مانند بتن با مقاومت فشاری کمتر از ۲۵ مگاپاسکال یا میلگردهای با قطرهای متفاوت، مانند میلگرد با قطر ۲۲ میلی متر، در تحقیقات گذشته بررسی نشده‌اند. در نتیجه موارد ذکر شده به صورت جداگانه مورد بررسی قرار گرفته است. این پژوهش با تعریف پنج نمونه آزمایشگاهی و استفاده از نتایج آزمایش‌های قبلی موجود در ادبیات فنی، برخی از پارامترهای موثر در روابط تنش پیوستگی لغزش میلگرد مدفون در بتن را بررسی می‌نماید.

۲- بررسی روابط تنش پیوستگی لغزش موجود

همان‌گونه که در مقدمه توضیح داده شد تا کنون روابط متعددی برای این منظور پیشنهاد شده‌اند که چند نمونه پرکاربرد از آن‌ها در ادامه بررسی می‌شود:

۱-۲- نمودار فیپ ۹۰

این نمودار که بر مبنای تحقیقات الینگوسن و همکاران تهیه شده است، شامل چهار بخش می‌باشد که روابط زیر برای آن‌ها ارایه شده است (واحد تنش پیوستگی، نیوتن بر میلی متر مربع است):

$$\tau_b = \tau_{bmax}(s/s_1)^\alpha \quad 0 \leq s \leq s_1 \quad (1)$$

$$\tau_b = \tau_{bmax} \quad s_1 \leq s \leq s_2 \quad (2)$$

$$\tau_b = \tau_{bmax} - (\tau_{bmax} - \tau_{bf})(s - s_2)(s_3 - s_2) \quad s_2 \leq s \leq s_3 \quad (3)$$

$$\tau_b = \tau_{bf} \quad s_3 \leq s \quad (4)$$

با استفاده از روابط بالا و مقادیر ارایه شده در شکل ۱ نمودار پیوستگی لغزش به دست می‌آید که در جدول ۱ نشان داده شده است [4]. در روابط بالا، τ_b (N/mm^2) تنش پیوستگی، τ_{bmax} تنش پیوستگی حداکثر، τ_{bf} تنش پس ماند و s (mm) میزان لغزش میلگرد است.

جدول ۱. جدول تعریف پارامترهای نمودار تنش پیوستگی کرنش بر اساس فیپ ۹۰ و ۲۰۱۰- اعداد داخل پرانتز مربوط به فیپ هستند [۸] [۱۰]

	Unconfined concrete		confined concrete	
	Good bond condition	Other bond conditions	Good bond condition	Other bond conditions
s_1 (mm)	$0.6 (s(\tau_{bu,split}))$	$0.6 (s(\tau_{bu,split}))$	1	1 (1.8)
s_2 (mm)	0.6 (s_1)	0.6 (s_1)	3 (2)	3 (3.6)
s_3 (mm)	1 (1.2 s_1)	2.5 (1.2 s_1)	clear rib spacing	clear rib spacing
α	0.4	0.4	0.4	0.4
τ_{max} (Mpa)	$2\sqrt{f_c}$ ($2.5\sqrt{f_c}$)	$\sqrt{f_c}$ ($1.25\sqrt{f_c}$)	$2.5\sqrt{f_c}$	$1.25\sqrt{f_c}$
τ_f (Mpa)	$0.15\tau_{max}$ (0)	$0.15\tau_{max}$ (0)	$0.4\tau_{max}$	$0.4\tau_{max}$

Table 1. Parameters defining the bond stress slip figure for Fip90 and 2010- values in parentheses are for Fip2010 [10] [8]

چهار عدد از نمونه‌های ساخته شده، بتن محصورشده و یکی محصورنشده است. طول مهاری مورد نیاز با فرضیات آیین نامه فوق به شرح جدول ۳ می‌باشد.

جدول ۲ مشخصات نمونه‌های آزمایشگاهی

Sample ID	Dim. (cm)	Confinement	Rebar Diam. (mm)	existing embedded length (mm)
P20S-1	30x30x30	✓	20	250
P22S-1	30x30x30	✓	22	250
P22S-2	30x30x30	✓	22	250
P25S-1	30x30x30	✓	25	250
P25S-2	30x30x30	✗	25	250

Table 2. specifications of tests

۱-۳- مصالح مصرفی

۱-۱-۳- بتن

در این آزمایش‌ها از بتن آماده معمولی برای ساخت تمام نمونه‌ها استفاده شده است. بعد از طی ۲۸ روز از بتن‌ریزی و عمل‌آوری لازم، برای یافتن مقاومت فشاری استوانه‌ای، سه نمونه تهیه شده به ترتیب در دستگاه قرار داده شد، که میانگین مقاومت فشاری استوانه‌ای استاندارد (۳۰۰x۱۵۰ میلی‌متر) آنها برابر ۲۳ مگاپاسکال به دست آمد.

در جدول ۱ و شکل ۱ پارامترهای مدل‌سازی و نمودار شماتیک آن نشان داده شده است. ملاحظه می‌گردد که اختلافاتی بین این نسخه و نسخه ۹۰ وجود دارد.

همان‌گونه که ملاحظه می‌شود در روابط ارایه شده، مقدار لغزش و مقاومت بتن تنها پارامترهای تأثیرگذار هستند و سایر پارامترها به دلیل ساده‌سازی یا موارد مانند آن در نظر گرفته نشده‌اند.

۳- بررسی نمونه‌های آزمایشگاهی

برای بررسی مؤلفه‌های موثر در بحث پیوستگی میلگرد به بتن پنج آزمایش به شرح جدول ۲ طراحی و ساخته شد. همه نمونه‌ها دارای هندسه یکسان هستند و تنها تفاوت موجود، قطر میلگرد است. نمونه‌های ساخته شده، دارای ابعاد سیصد میلی‌متر در طول، عرض و ارتفاع هستند. تمام میلگردها دارای طول مدفون ۲۵۰ میلی‌متر در داخل بتن می‌باشند و همان‌گونه که در جدول ۳ مشاهده می‌شود طول مهاری مورد نیاز (l_d) آیین‌نامه ACI318 [11] را تأمین ننموده‌اند. در برخی از پژوهش‌های قبلی، در طول کوتاهی، در جهت اعمال بار، اتصال بین بتن و میلگرد حذف می‌شود تا اثر ترک‌های گوه‌ای در نظر گرفته شود؛ در این پژوهش با توجه به نوع ابزاربندی، این پدیده شکل نمی‌گیرد، در نتیجه حذف اتصال بین بتن و میلگرد صورت نگرفته است.

به ترتیب نمونه ساخته شده، ابزاربندی شماتیک و نمونه ابزاربندی شده را نشان می‌دهد.

۳-۳- انجام آزمایش‌ها

نمونه‌ها به ترتیب تحت آزمایش بیرون کشیدن مطابق شکل ۴ قرار گرفتند. جک هیدرولیک تعبیه شده، فشار محوری به بتن و نیروی کششی به میلگرد وارد نمود و نیروسنج (Load cell) مقدار نیروی میلگرد را اندازه گرفت. بارگذاری به صورت کنترل جابه‌جایی انجام شده است. جابه‌جایی محوری توسط دو تغییر مکان سنج (LVDT) سنجیده شد و میانگین آن‌ها مد نظر قرار گرفت. میلگرد تا حدود ده میلی‌متر کشیده شده است.

شکل ۳ نمونه ساخته شده



Fig. 3. Specimen picture
شکل ۴. ابزاربندی آزمایش

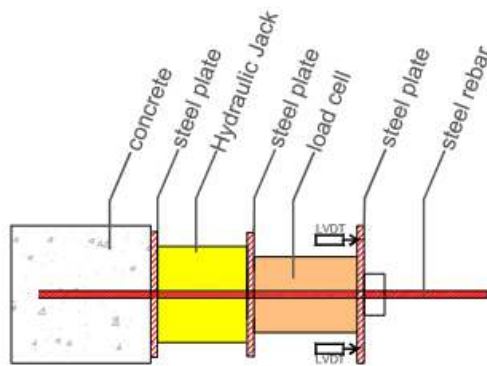


Fig. 4. Test setup

جدول ۳. طول مهاری مورد نیاز در مقایسه با طول مهاری موجود مدفون در بتن

d_b	f_y (MPa)	f_c	ψ_t	ψ_e	ψ_s	λ	l_d (mm)	l_{ext} (mm)
20	410	23	1	1	1	1	814	250
22	410	23	1	1	1	1	1106	250
25	410	23	1	1	1	1	1257	250

Table 3 required development length vs existing embedded length

۳-۱-۲- میلگرد

مشخصات میلگردهای مصرفی در جدول ۴ نشان داده شده است. همه میلگردها از نوع آج‌دار هستند. h_r و s_r به ترتیب ارتفاع و فاصله آج میلگردها از هم است [12]. ϵ_{max} کرنش حداکثر میلگرد در تست کشش است.

جدول ۴ مشخصات میلگردهای مصرفی

Diam. (mm)	Designation	type	h_r (mm)	s_r (mm)	f_y (MPa)	f_u (MPa)	ϵ_{max}
20	S400	deformed	3	12	487	639	0.29
22	S400		3.2	13.2	451	624	0.31
25	S400		3.75	15	486	629	0.30

Table 4. specification of rebars

برای یافتن مقاومت، از هر قطر میلگرد سه نمونه تحت آزمایش کشش قرار گرفت که مقاومت تسلیم و نهایی آن‌ها به طور متوسط برابر ۴۷۴ و ۶۳۰ مگاپاسکال به دست آمد.

۳-۲- ساخت نمونه‌ها

نمونه‌ها در آزمایشگاه سازه مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی ساخته شد و مورد آزمایش بیرون کشیدگی قرار گرفت. با توجه به این که دو حالت محصور شده و محصور نشده در این آزمون‌ها در نظر گرفته شده بود، ضمن یک راه حل ابتکاری، برای نمونه‌های با بتن محصور شده، از روش محصورشدگی خارجی استفاده شد. به این ترتیب که وجوه جانبی نمونه با جفت نبشی‌هایی، تحت فشار جانبی قرار گرفته و شرایط بتن محصور را ایجاد نموده است. همانطور که در بخش نتایج نشان داده شده است، با توجه به آزمایش‌های سایر پژوهشگران و نتایج به دست آمده، پاسخ‌های به دست آمده از این روش مطابق با نمونه‌هایی است که از خاموت برای محصور شدن بتن استفاده شده است [7, 12, 15]. اشکال (۳ و ۴ و ۵)

۴- نتایج آزمایش‌ها

۴-۱- مشاهدات و مود شکست

پس از انجام آزمایش‌های برنامه ریزی شده، دو نوع رفتار و مود شکست مشاهده شد. در صورت محصور شدن نمونه، بتن اطراف میلگرد در حال کشش دچار از هم گسیختگی برشی می‌شود و حالت بیرون کشیدگی میلگرد (Pullout) رخ می‌دهد (شکل ۶). در شکل ۷ لغزش میلگرد و بیرون کشیده شدن آن در آزمایش نشان داده شده است. دلیل وقوع این مود شکست آن است که انرژی مورد نیاز برای شکست بتن کنار میلگرد کمتر از انرژی مورد نیاز برای ترک خوردن و گسیختگی بتن کل نمونه است. شکل ۵. تنظیمات آزمایش بیرون کشیدگی میلگرد برای بتن محصور شده



Fig. 5. Test setup for pullout test of confined concrete

شکل ۶. سازوکار ترک و آسیب در سطح میلگرد: (a) نمای کناری (b) نمای روبرو [12]

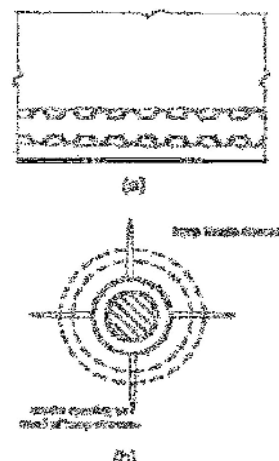


Fig. 6. Cracking and damage mechanisms in bond: a) side view b) front view [12]

در این حالت با وجود عدم گسیختگی کلی، بعد از اعمال نیرو ترک‌های مویی در اطراف میلگرد شکل گرفت.

در حالت دیگر اگر نمونه محصور شده نباشد، در اثر جابه‌جایی میلگرد، نمونه به طور کلی دچار گسیختگی (splitting) می‌گردد. دلیل این امر، وجود آج‌ها در میلگرد است. این آج‌ها نیرو محوری میلگرد را در مجاورت بتن تبدیل به نیروهای برشی و محوری در جهات دیگر می‌نماید. این نیروها می‌توانند بتن را دچار گسیختگی کنند. در یک عضو بتنی دارای میلگرد عرضی مانند خاموت، این اجزا، در مقابل نیروهای ایجاد شده مقاومت می‌نمایند. شکل ۸ این نیروها را نشان می‌دهد.

شکل ۷ تصویر میلگرد بیرون کشیده شده (Pullout) برای P25S1



Fig. 7. Picture of pulled out rebar (P25S1)

شکل ۸. نمای جانبی میلگرد آج‌دار و نیروها و عکس‌العمل‌های آن [12]

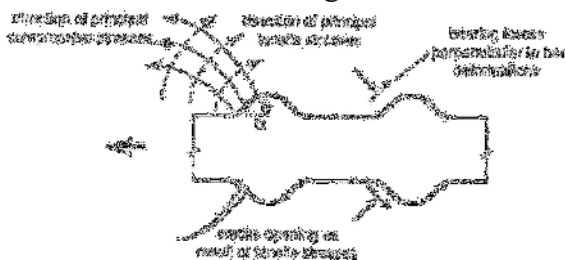


Fig. 8. Side view of a deformed bar and its forces and reactions [12]

در این پژوهش هر دو نوع رفتار مشاهده شد. در نمونه‌هایی که بتن محصور شده دارند، رفتار pullout و در نمونه با بتن محصور نشده رفتار splitting دیده شد. شکل ۷ و ۹ به ترتیب نشانگر

این دو هستند.

ملاحظه می شود که وجود محصورشدگی عملکرد کلی عضو بتنی را در حد قابل ملاحظه ای ارتقا می بخشد. به علاوه نتایج به دست آمده نیز بسیار متفاوت است، که در ادامه توضیح داده خواهد شد.

۴-۲- نتایج آزمایش ها

پس از انجام آزمایش ها و به دست آوردن نیرو و جابه جایی، مقدار تنش پیوستگی با فرض ثابت بودن این مؤلفه از ابتدا تا انتهای میلگرد می آید. هر چند فرض ثابت بودن تنش پیوستگی در برخی اوقات ممکن است نادرست باشد، در بیشتر تحقیقات انجام شده این فرض صورت گرفته است [12]. به علاوه از آنجا که عملکرد کلی مورد نظر است، تنش متوسط، بیانگر میانگین تنش در بخش های مختلف سطح میلگرد مدفون در بتن است؛ در نتیجه در حالت کلی و دیدگاه ماکرو، نتایج کاملاً صحیح و قابل استناد خواهد بود.

شکل ۹. تصویر بتن گسیخته شده بعد از تست (P25S-2)



Fig. 9. Picture of split concrete (P25S-2) after test

باعث کاهش تنش پیوستگی حداکثر می شود (در میلگردهای قطر ۲۲ و ۲۵ میلی متر، نسبت به قطر ۲۰ میلی متر، به ترتیب حدود ۴ و ۱۰ درصد کاهش تنش حداکثر مشاهده می شود). همچنین لغزش متناظر با کرنش حداکثر، در محدوده ۱/۴ تا ۲ میلی متر است. در طرف مقابل برای نمونه P25S2 که بتن، محصور نشده است نمودار پیوستگی در مقابل لغزش به صورت شکل ۱۲ است.

شکل ۱۰. نمودار تنش پیوستگی لغزش

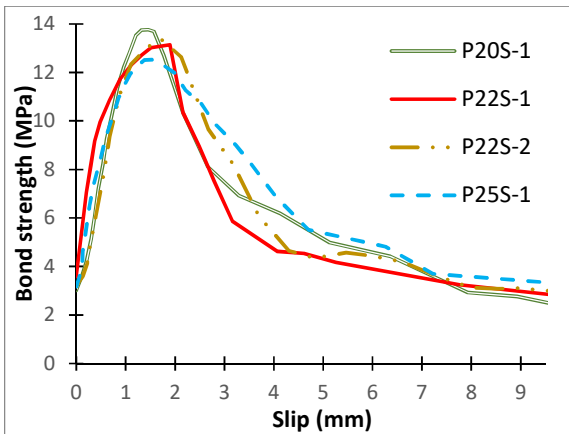


Fig. 10. Bond strength - slip diagram

شکل ۱۱. نمودار تنش پیوستگی کرنش در محدوده تنش حداکثر

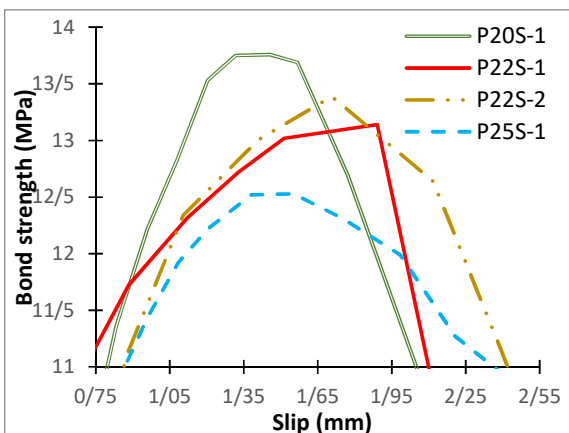


Fig. 11. Bond strength - slip diagram in maximum stress range

در بررسی نتایج به دست آمده نمونه P20S-1 تا P25S-1 می توان گفت که سختی اولیه به سرعت (هنگام لغزش بسیار اندکی) زیاد می شود و تقریباً به مقدار ثابتی می رسد. بعد از گذراندن این مرحله، هنگامی که با افزایش لغزش، به حد نهایی تنش پیوستگی نزدیک می شود، شیب نمودار (سختی) شروع به کم شدن کرده تا به صفر برسد (در لغزشی حدود ۱/۴ تا ۲ میلی متر). سپس سختی به شدت کاهش یافته تا به لغزشی معادل

برای مقایسه نتایج آزمایش ها باید نمودارهای تنش پیوستگی در مقابل لغزش را به دست آورد و آن را تحلیل نمود [2].

شکل ۱۰ بیانگر تنش پیوستگی در مقابل لغزش برای نمونه های P20S-1 تا P25S-1 است. به لحاظ اهمیت ناحیه تنش حداکثر و برای بحث بیشتر روی آن، این ناحیه در شکل ۱۱ نمایش داده شده است. نتایج به دست آمده به صورت کامل بررسی خواهد شد، اما به صورت خلاصه باید گفت که افزایش قطر میلگرد

۲۹ تا ۵۴ مگاپاسکال). در شکل ۱۳ چند نمودار مربوط به این تحقیق ملاحظه می شود.

شکل ۱۳ نمودارهای بیرون کشیدگی میلگرد الینگاوسن [1]

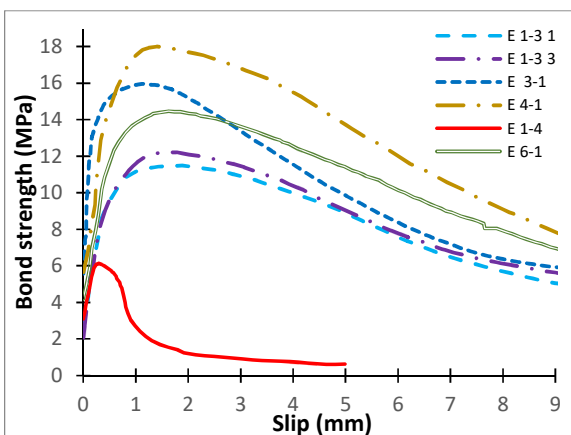


Fig. 13. Elingausen pullout diagrams [1]

والکند و همکاران هم تعدادی آزمایش در این موضوع انجام داده اند. هر چند موضوع اصلی آن تحقیق بتن خود متراکم است اما چند آزمایش شاهد هم با بتن عادی انجام داده اند که می تواند استفاده شود [7]. نمودارهای ارایه شده توسط این پژوهشگران، مربوط به کشش میلگرد تا نقطه حداکثر تنش است، و مقدار تنش پیوستگی در لغزش های بیش از آن گزارش نشده است. با این وجود، اطلاعات ارایه شده برای مقایسه با سایر نمونه ها کفایت می کند (شکل ۱۴). در این آزمایش ها نمونه بتنی مکعبی محصور شده و با مقاومت فشاری استوانه ای حدود ۳۰ تا ۶۳ مگاپاسکال هستند. میلگردهای استفاده شده طول مهاری ناکافی دارند.

در نهایت بیجاج با انجام چند آزمایش روی بتن های عادی و مقاومت بالا در این موضوع تحقیق کرده است که نتایج مربوط به بتن های با مقاومت عادی می تواند استفاده شود. البته موضوع اصلی آن تحقیق مفاصل پلاستیک تیرها است که آزمایش بیرون کشیدگی به صورت جانبی صورت گرفته است [13]. وی در گزارشی دیگر نتایج آزمایش های میلگرد در بتن را به صورت تفکیک شده ارایه نموده است [14] (شکل ۱۵). در این تحقیق نمونه ها استوانه ای ساخته شده اند که محصور شده اند. میلگردها طول مهاری ناکافی دارند و از بتن با مقاومت استوانه ای ۲۷ تا ۹۶ مگاپاسکال استفاده شده است.

تقریباً دو برابر لغزش متناظر با تنش حداکثر (یعنی حدود ۴ میلی متر) برسد (پیوستگی در این ناحیه حدود ۵۰ تا ۶۰ درصد افت می کند). از این قسمت سختی با شیب ملایم تری کاهش می یابد و تنش تقریباً حالت ثابت پیدا می کند (در واقع تغییرات تنش جزئی می شود).

شکل ۱۲. نمودار تنش پیوستگی لغزش برای بتن محصور نشده

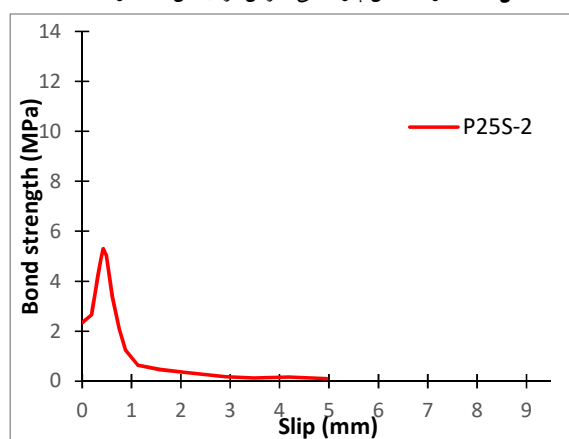


Fig. 12. Bond strength - slip diagram for unconfined concrete

در نمونه محصور نشده با اینکه شکل کلی تقریباً مشابه است اما به دلیل عدم وجود فشار جانبی، نمونه خیلی سریع (در لغزش حدود ۰/۴ میلی متر) به حداکثر تنش می رسد و بلافاصله دچار افت می شود. افت پیوستگی تا حدود لغزش ۱/۱ میلی متر به سرعت ادامه پیدا می کند. در اینجا نیز شیب نمودار بعد از افت سریع، با شدت کمتری کاهش می یابد و تنش پیوستگی به صفر میل می کند.

۳-۴ نتایج آزمایش های سایر محققان

برای تکمیل اطلاعات این پژوهش، درستی آزمایی و افزایش دامنه نتایج، سه نمونه دیگر از پژوهش های مشابه مورد بررسی قرار گرفتند. اولین پژوهش مربوط به الینگاوسن و همکاران است که با انجام صد و بیست و پنج آزمایش بررسی جامعی روی موضوع داشته اند [1, 2]؛ هر چند تعداد محدودی از این آزمایش ها مطابق اهداف این پژوهش هستند و سایر آن ها شرایط متفاوتی دارند که خارج از این تحقیق است.

شرایط کلی آزمایش های مرتبط به این صورت است: نمونه بتنی مکعبی محصور شده با خاموت و در مواردی غیر محصور، طول مهاری غیر کافی و بتن با مقاومت های فشاری متفاوت (از حدود

دست می‌آید تاثیر مثبت افزایش مقاومت بتن در افزایش پیوستگی است. اما این افزایش به صورت خطی نیست. در این تحقیق، مقاومت‌های بتن در محدوده ۲۲ تا ۵۷ مگاپاسکال بررسی شده است. احتمالاً بتن‌های با مقاومت بسیار کم یا بسیار زیاد رفتار متفاوتی نشان دهند، اما بیشتر بتن‌های مورد استفاده در همین بازه قرار می‌گیرند.

تاکنون برخی از پژوهشگران این موضوع را بررسی کرده و به نتایج متفاوتی رسیده‌اند. اورنگان و همکاران در سال ۱۹۷۵، برای میلگردهای با طول مهاری کافی، بیان داشتند که تنش پیوستگی با ریشه دوم مقاومت فشاری استوانه‌ای بتن رابطه مستقیم دارد [15]. ساچی اوغلو نیز در سال ۱۹۹۲ برای میلگردهای با طول مهاری کافی، رابطه‌ای ارایه کرد و همین تناسب را بیان نمود [5]؛ البته رابطه وی برای میلگردهای با طول مهاری ناکافی معتبر نیست. داروین و همکاران در سال ۱۹۹۲ این نسبت را، برای بتن نامحصور، به مقدار $\sqrt[4]{f'_c}$ بیان داشتند [16]. ژو و داروین در سال ۲۰۰۰، بیان داشتند که تنش پیوستگی با $f'_c{}^{3/4}$ رابطه مستقیم دارد [17]. در پایان کمیته ACI 408 در سال ۲۰۰۳ مانند داروین این تناسب را به مقدار $\sqrt[4]{f'_c}$ بیان کردند [12].

شکل ۱۶ مقایسه تنش پیوستگی برای مقاومت فشاری‌های متفاوت بتن

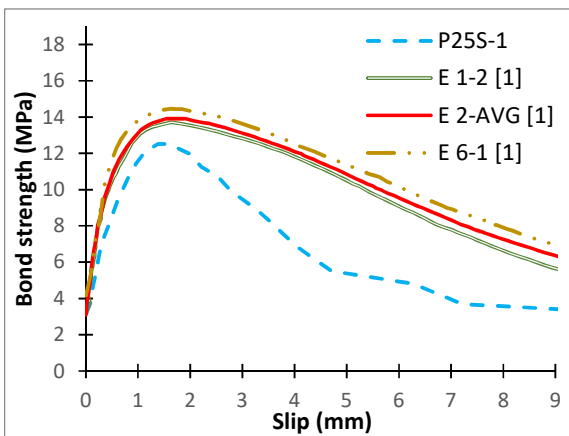


Fig. 16. bond strength comparison for different f_c

همان‌گونه که بیان شد نظرات متفاوتی برای رابطه مقاومت فشاری بتن با تنش پیوستگی وجود دارد و بیشتر آن‌ها نیز برای میلگردهای با طول مهاری کافی بیان شده‌اند.

شکل ۱۶ نمودار چند آزمایش انجام شده با مقاومت بتن

با توجه به توضیحات ارایه شده، می‌توان نتایج تحقیقات پژوهش‌های فوق را با پژوهش فعلی مقایسه نمود.

شکل ۱۴ نمودارهای بیرون کشیدگی میلگرد والکند [7]

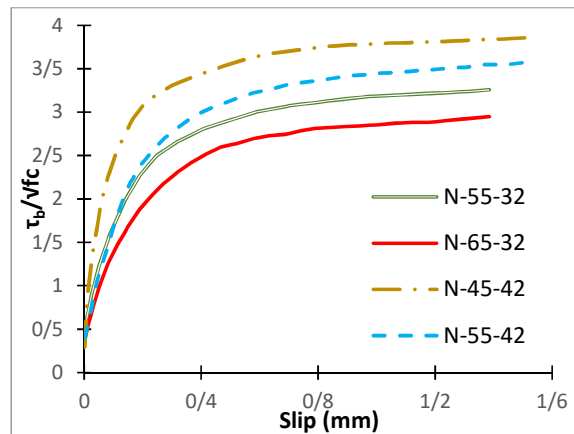


Fig. 14. Valcunde pullout diagrams [7]

شکل ۱۵ نمودارهای بیرون کشیدگی میلگرد بیجاج [13]

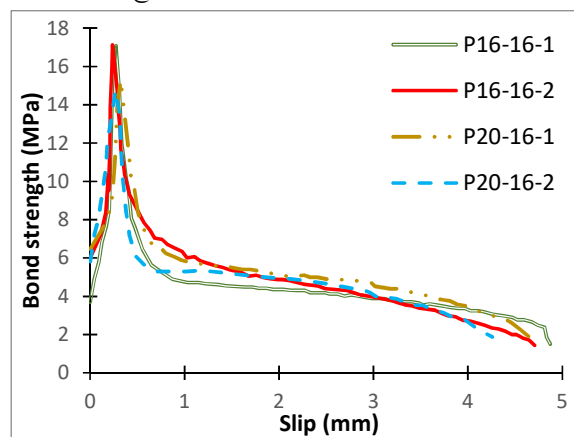


Fig. 15. Bigaj pullout diagrams [13]

۵- بررسی پارامترهای تاثیرگذار در پیوستگی میلگرد به بتن

بعد از به دست آوردن نتایج حاصل از آزمایش‌ها و با کمک نتایج سایر پژوهشگران می‌توان به صورت دقیقی به بررسی چند مؤلفه تاثیرگذار در پیوستگی میلگرد به بتن پرداخت. واضح است علاوه بر مواردی که بررسی شده است، چندین پارامتر دیگر وجود دارند که می‌توانند در پژوهش‌های بعدی مورد بررسی قرار گیرند.

۵-۱- مقاومت فشاری بتن (f'_c)

یکی از مهمترین مؤلفه‌های تاثیرگذار در رفتار میلگرد مدفون در بتن، مقاومت فشاری بتن است. آنچه از مشاهده نتایج مربوطه به

استوانه‌ای بتن در افزایش پیوستگی وقتی حاصل می‌شود که مانند شکل ۸ نیروها در جهتی باشند که در بتن ایجاد ترک نمایند. در شکل ذکر شده، نیروهایی که در اثر آج میلگرد به بتن وارد می‌شوند، ایجاد کشش می‌نمایند. در نتیجه مقاومت کششی بتن وارد عمل می‌شود نه مقاومت فشاری آن؛ همین نکته به خوبی ثابت می‌نماید که چرا تنش پیوستگی در بتن محصور نشده کمتر به دست می‌آید؛ زیرا میلگردهایی که وظیفه مقابله با این نیروی کششی را دارند، حضور ندارند. همچنین با توجه به آیین‌نامه ACI318، مقاومت کششی بتن با $\sqrt{f'_c}$ رابطه دارد [11].

از بحث بالا می‌توان نتیجه گرفت که افزایش تنش پیوستگی متناسب با جذر مقاومت فشاری بتن است. این نکته در جدول ۵ لحاظ شده است. در این جدول تنش پیوستگی حداکثر آزمایش های مختلف بر مبنای قطر میلگرد ارایه شده است. سپس این تنش با رابطه زیر مقیاس شده است:

$$\tau_{b-scaled} = \tau_b \times \sqrt{\frac{f'_{c-2}}{f'_{c-1}}} \quad (6)$$

که در آن f'_{c-2} مقاومت فشاری است که نسبت به آن مقیاس می‌شود و f'_{c-1} مقاومت فشاری اصلی نمونه است. مقیاس نسبت به ردیف اول هر قسمت، انجام شده است. با بررسی ستون درصد خطا، مشاهده می‌شود که برای همه نمونه‌ها خطا کم‌تر از ده درصد است که نشان دهنده دقت مناسب رابطه پیشنهادی است. دلیل این خطای اندک نیز موثر بودن پارامترهای دیگر است که برخی از آنها در ادامه بررسی خواهد شد.

مورد دیگر که نیاز است توجه شود این است که درستی رابطه بالا در بتن‌های فوق‌العاده پرمقاومت ممکن است صحیح نباشد. به عنوان نمونه برای ۴ آزمایش بیج‌اج، با بتن دارای مقاومت فشاری ۹۴/۵ مگاپاسکال (P16-HS-1 تا P20-HS-2)، تنش پیوستگی حداکثر حدود ۲۰ تا ۲۵ مگاپاسکال به دست آمده است [14]. در صورتی که با رابطه ۶ این مقدار باید حدود ۳۱ مگاپاسکال به دست می‌آمد؛ در نتیجه بتن‌های با مقاومت بسیار بالا (بیش از ۶۰ مگاپاسکال) نیازمند تحقیق جداگانه‌ای هستند.

۲-۵- قطر میلگرد

دومین پارامتر مهم در تنش پیوستگی، قطر میلگرد است. هر چند

مختلف را نشان می‌دهد. نمودار با کمترین تنش پیوستگی، مقاومت استوانه‌ای ۲۳ مگاپاسکال دارد. سایر نمودارها مقاومت محوری بتن حدود ۳۱ مگاپاسکال دارند. با توجه به مشابهت روند و مشخصات آزمایش‌ها امکان مقایسه آنها وجود دارد. در همه آزمایش‌ها، قطر میلگرد ۲۵ میلی‌متر است. همان‌گونه که مشخص است با افزایش مقاومت بتن حداکثر تنش پیوستگی افزایش می‌یابد. اما این افزایش به صورت خطی نیست. به عنوان مثال در آزمایش P25S-1 مقاومت بتن ۲۳ مگاپاسکال و حداکثر تنش ۱۲/۵۳ مگاپاسکال است. همین مقادیر برای تست 2-AVG الینگاوسن به ترتیب ۲۹/۶ و ۱۳/۹۱ است [1]. یعنی به ازای ۲۹ درصد افزایش مقاومت بتن، ۱۱ درصد تنش پیوستگی حداکثر زیاد شده است.

جدول ۵. مقایسه تنش پیوستگی آزمایش‌های مختلف بر مبنای قطر میلگرد و مقاومت فشاری بتن و مقیاس کردن آنها

No.	Research	Specimen ID	τ_{b-max} (test)	f'_c	$\tau_{b-scaled}$ (رابطه ۶)	Error %
Bar diameter: 25 mm						
1	shahrabi-farahbod	P25S-1	12.53	23	12.53	0%
2		1-1,1	13.71	29.4	12.13	3%
3		1-1,2	13.26	29.4	11.73	6%
4		1-2	13.72	30.5	11.91	5%
5	Elingausen	1-5,1	13.26	30.5	11.51	8%
6	[1]	1-5,2	14.93	30.5	12.97	3%
7		4-1	18.01	54.6	11.69	7%
8		6-1	14.46	31	12.46	1%
9		2-AVG	13.91	29.6	12.26	2%
10		3-2	15.36	31.6	13.10	5%
Bar diameter: 20 mm						
1	shahrabi-farahbod	P20S-1	13.76	23	13.76	0%
2	Bigaj	P20-16-1	15.31	27.6	13.98	2%
3	[14]	P20-16-2	14.77	27.6	13.48	2%
Bar diameter: 16 mm						
1	Bigaj	P16-16-1	17.07	27.6	17.07	0%
2	[14]	P16-16-2	17.11	27.6	17.11	0%
3	Valcunde	N-65-32	14.07	22.75	15.49	9%
4	[7]	N-55-32	18.92	33.76	17.11	0%

Table. 5. comparison of bond stress of different test based on bar diameter and compressive strength of concrete

نکته قابل توجه در اینجا این است که بیشترین اثر مقاومت

شکل ۱۷ نمودار حداکثر تنش پیوستگی مقیاس شده در مقابل قطر میلگرد

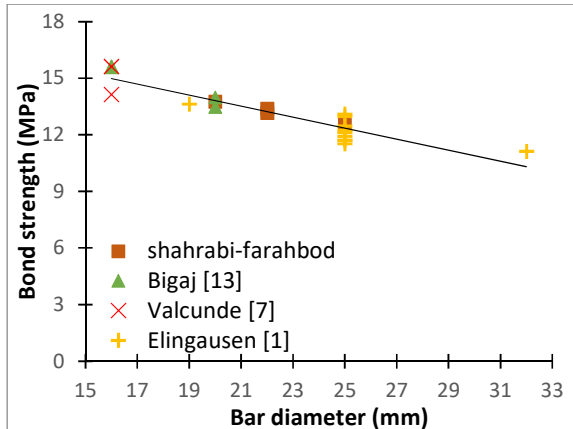


Fig. 17. Maximun scaled bond strength vs. bar diameter diagram

در جدول (۶) جزئیات این نتایج نشان داده شده است. نکته مهم در نتایج به دست آمده این است که طبق محاسبه آماری، ضریب همبستگی نتایج (-0.92) است. این عدد بیانگر دو مطلب است. اول اینکه این دو مؤلفه رابطه معکوس دارند و دیگر اینکه رابطه آن‌ها با دقت خوبی به صورت خطی است. پس می‌توان یک رابطه پیشنهاد کرد تا به وسیله آن با دانستن حداکثر تنش پیوستگی برای یک قطر میلگرد، به مقدار این تنش برای قطری دیگر رسید.

جدول ۶. تنش پیوستگی مقیاس شده آزمایش‌های مختلف

اثر این مؤلفه نسبت به مقاومت فشاری بتن کم‌تر است، اما در همه آزمایش‌ها اثر آن مشهود بوده است.

به صورت کلی با نگاه به روند نمودار حداکثر تنش پیوستگی در مقابل قطر میلگرد، می‌توان نتیجه‌گیری کرد که هر چه قطر میلگرد افزایش یابد، بیشترین تنش پیوستگی آن کاهش می‌یابد. زیرا میلگرد با قطر بیشتر نیازمند طول مهارتی بیشتری از میلگردی با قطر کمتر است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که قطر میلگرد و بیشترین تنش پیوستگی رابطه معکوس دارند و با افزایش یکی، دیگری کاهش می‌یابد.

در شکل ۱۷ رابطه قطر و تنش پیوستگی حداکثر نشان داده شده است. برای رسم این نمودار نتایج سه پژوهش سابق و آزمایش‌های این تحقیق تصویر شده‌اند.

برای اینکه امکان مقایسه نتایج وجود داشته باشد، باید تنش حداکثر آزمایش‌های مختلف، به یک مقاومت فشاری بتن مقیاس می‌شدند. در نتیجه همه نتایج با استفاده از رابطه ۶ به مقاومت فشاری ۲۳ مگاپاسکال (مقاومت فشاری بتن این تحقیق) مقیاس شدند (ستون $(T_b\text{-scaled } (f_c=23 \text{ Mpa}))$).

رابطه پیشنهادی به صورت مقابل است:

$$\tau_{b,d_{b-2}} = \tau_{b,d_{b-1}} \times \frac{1 - 0.015 \times d_{b-2}}{1 - 0.015 \times d_{b-1}} \quad (7)$$

در رابطه هفت، τ_{b,d_b} تنش پیوستگی حداکثر (MPa) و d_b قطر میلگرد (mm) است. با استفاده از رابطه فوق، ستون τ_{b-eq} در جدول ۶ محاسبه شده است (همه نتایج نسبت به ردیف ۱ مقیاس شده‌اند). در ستون درصد خطا، نیز تفاوت این عدد با نتایج واقعی نشان داده شده است. مشخص است که دقت نتایج مناسب است و این رابطه می‌تواند در محاسبات مورد استفاده گیرد.

۳-۵- محصورشدگی بتن

اثر مثبت محصور شدن بتن در رفتار یک سازه بتن مسلح به اثبات رسیده است و آیین‌نامه‌های طراحی، این اصل را در بسیاری از بخش‌ها با روش‌هایی که معرفی می‌کنند، رعایت می‌کنند [11]. در زمینه رفتار بیرون کشیدگی میلگرد در بتن، آزمایش‌ها معمولاً به صورت محصور شده انجام شده است. در این پژوهش یک آزمایش محصور نشده مطابق جدول ۲ صورت پذیرفته است. همچنین الینگاوسن دو آزمایش محصور نشده را انجام داده است [1].

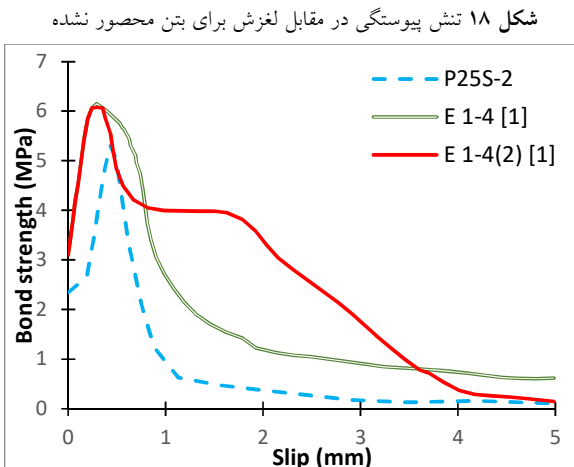


Fig. 18. Unconfined concrete , bond strength vs. slip

همانطور که از شکل ۱۸ مشخص است، تنش پیوستگی حداکثر نسبت به حالت محصور شده افت شدیدی کرده است. طبق محاسبات، این تنش حدود ۴۰ تا ۴۴ درصد تنش حداکثر در نمونه‌های محصور شده است.

در زمینه لغزش متناظر با تنش حداکثر نیز این افت مشهود است. به این صورت که این لغزش حدود ۱۵ تا ۳۰ درصد لغزش حالت محصور شده است. سومین اثر عدم محصورشدگی هم در شاخه نزولی نمودار (بعد از نقطه حداکثر) مشخص می‌شود. به

No.	Researcher	Specimen ID	τ_{b-max} (test)	f'c	d_b	$\tau_{b-scaled}$ (f'c=23 Mpa)	τ_{b-eq} (eq.7)	Error %
1	shahrabi-farahbod	P20S-1	13.76	23	20	13.76	13.76	0.0%
2		P22S-1	13.14	23	22	13.14	13.17	0.2%
3		P22S-2	13.39	23	22	13.39	13.17	1.6%
4		P25S-1	12.53	23	25	12.53	12.29	1.9%
5		1-1,1	13.71	29.4	25	12.13	12.29	1.3%
6	Elingausen [1]	1-1,2	13.26	29.4	25	11.73	12.29	4.8%
7		1-2	13.72	30.5	25	11.91	12.29	3.1%
8		1-5,1	13.26	30.5	25	11.51	12.29	6.7%
9		1-5,2	14.93	30.5	25	12.97	12.29	5.2%
10		4-1	18.01	54.6	25	11.69	12.29	5.1%
11	Bigaj [14]	6-1	14.46	31	25	12.46	12.29	1.4%
12		2-AVG	13.91	29.6	25	12.26	12.29	0.2%
13		3-1	15.97	31.6	19	13.62	14.05	3.2%
14		3-2	15.36	31.6	25	13.10	12.29	6.2%
15		3-3	13.04	31.6	32	11.12	10.22	8.1%
16	Valcunde [7]	P16-16-1	17.07	27.6	16	15.58	14.94	4.1%
17		P16-16-2	17.11	27.6	16	15.62	14.94	4.4%
18		P20-16-1	15.31	27.6	20	13.98	13.76	1.5%
19		P20-16-2	14.77	27.6	20	13.48	13.76	2.1%
20	Valcunde [7]	N-65-32	14.065	22.75	16	14.14	14.94	5.6%
21		N-55-32	18.92	32.76	16	15.62	14.94	4.3%

شکل ۱۹ تصویر شماتیک از چگونگی انجام آزمایش توسط الینگاوسن [1]

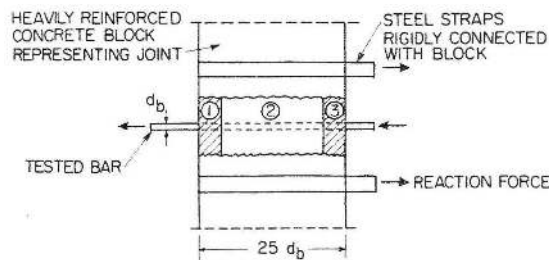


Fig. 19. Elingausen schematic test setup [1]

نیروی محوری ذکر شده، خطایی است که در تحقیقات الینگاوسن و سایر پژوهشگران مشاهده نمی‌شود. برای محاسبه این نیرو، می‌توان از مفهوم نیروی اتکایی (Bearing strength) استفاده نمود. آیین‌نامه ACI318-19 این نیرو را مطابق رابطه زیر تعریف می‌نماید [11]:

$$B_u = \min \left\{ \sqrt{\frac{A_2}{A_1}} (0.85 \times f'_c \times A_g), 2(0.85 \times f'_c \times A_1) \right\} \quad (8)$$

در رابطه بالا A_2 سطح بتن اتکا شونده، A_1 سطح اتکا کننده (مساحت نوک میلگرد) است. برای آزمایش‌های انجام شده در این تحقیق در حالت فشاری، نتیجه به صورت جدول (۷) می‌شود.

جدول ۷. تنش پیوستگی با اعمال نیرو فشاری

No.	Specimen ID	τ_{b-max}	f'_c	B_u (eq. 8)	$\tau_{b-total}$	Increase percentage of bond strength
1	P20S-1	13.76	23	12277	14.54	5%
2	P22S-1	13.14	23	14856	14.00	6%
3	P22S-2	13.39	23	14856	14.25	6%
4	P25S-1	12.53	23	19183	13.51	7%

Table 7. Bond strength in compression forces

در این جدول، B_u طبق روابط ۸ و $\tau_{b-total}$ از جمع حداکثر تنش پیوستگی (τ_{b-max}) و تقسیم B_u سطح جانبی میلگرد (l_d) طول مدفون میلگرد در بتن (میلی‌متر) و d_b قطر میلگرد (میلی‌متر) به دست می‌آید:

$$\tau_{b-total} = \tau_{b-max} + \frac{B_u}{\pi \times l_d \times d_b} \quad (9)$$

ملاحظه می‌شود که در حالت فشاری، تنش پیوستگی بین ۵ تا ۷ درصد زیاد می‌شود و هر چه قطر میلگرد بیشتر باشد اثر آن بیشتر

این صورت که کاهش تنش به شدت بسیار بیشتری نسبت به حالت محصور شده به وقوع می‌پیوندد. نتیجه این که پیوستگی میلگرد بسیار سریع به حداکثر خود رسیده و بعد از آن به سرعت به تنش پس‌ماند می‌رسد. در لغزش حدود ۴ میلی‌متر تنش پس‌ماند تقریباً به صفر می‌رسد. در این لغزش ترک‌های بتن، از هم باز شده و اصطکاک بتن و میلگرد به کمترین حد خود می‌رسد (شکل ۹).

با توجه به شکل‌های (۱۰ و ۱۲)، تفاوت حالت محصور شده و محصور نشده مشخص می‌شود و همانطور که گفته شده تنش حداکثر، تنش پس‌ماند و لغزش متناظر با تنش حداکثر، به مقادیر ذکر شده کاهش می‌یابد. با این حال، شیب ناحیه پیش از تنش حداکثر در نمونه محصور نشده، تفاوتی با حالت محصور شده ندارد.

۴-۵- کشش یا فشاری بودن نیروی وارد شده به میلگرد

هر چند بیشتر آزمایش‌های بیرون کشیدن میلگرد در ادبیات فنی به صورت کششی انجام شده است، ولی به علت ماهیت رفت و برگشتی زلزله، هر دو رفتارهای کششی و فشاری اهمیت دارد. الینگاوسن هنگام تحقیقات خود، با آزمایش چند نمونه فشاری در مقابل نمونه‌هایی با نیروهای کششی در انتهای میلگرد، نتیجه‌گیری کرده است که تفاوت پاسخ در نیروهای کششی و فشاری ناچیز است و این از محاسبات تحلیلی نیز اثبات می‌شود [1]. نکته‌ای که در آن پژوهش به آن توجه نشده است، نوع انجام آزمایش است که تاثیر مستقیم بر نتایج حاصل شده گذاشته است. شکل ۱۹ تصویر شماتیک از چگونگی انجام آزمایش توسط ایشان است. همان‌طور که در این تصویر قابل مشاهده است، انتهای میلگرد بیرون از بتن است. این امر خطایی را در اندازه‌گیری جابه‌جایی ناشی از لغزش به وجود می‌آورد. زیرا در عمل، انتهای میلگرد در داخل بتن (با در نظر گرفتن پوشش کافی بتن روی میلگرد) رها می‌شود. در اثر فشار وارد شده بر میلگرد، بدنه میلگرد به صورت برشی (تنش پیوستگی) مقاومت می‌کند و نوک میلگرد هم به صورت محوری به بتن نیرو وارد می‌کند. در حالی که در نیروی کششی، فقط بدنه میلگرد فعال است.

است. می‌توان نتیجه گرفت که در حالت اعمال بار به صورت فشاری وضعیت بهتر می‌شود و پیوستگی بیشتری وجود دارد. همچنین به علت تغییر الگوی انتقال بار از میلگرد به بتن، احتمالاً نمودار تنش پیوستگی - لغزش تفاوتی از نظر ظاهری داشته باشد و سختی بخش صعودی افزایش یابد.

۶- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، به دلیل کاستی‌های تحقیقات گذشته در بحث پیوستگی میلگرد مدفون در بتن، از جمله بررسی جامع پارامترهایی از قبیل اثر دقیق مقاومت بتن، قطر میلگرد، فشاری یا کششی بودن نیروی وارد شده و محصورشدگی، به کمک آزمایش بیرون کشیدن میلگرد از بتن (pullout test) پیوستگی میلگرد به بتن و خواص آن بررسی شد. به این منظور پنج آزمایش طراحی و اجرا شد. نتایج آن از نظر نیرویی و لغزش سنجیده شد. برای جامعیت تحقیق، نتایج حاصل از سه پژوهش معتبر دیگر نیز استفاده شد. در نهایت نتایج زیر به دست آمد:

۱) دو مود شکست در آزمایش بیرون‌کشیدگی میلگرد از بتن ممکن است: بیرون آمدن میلگرد از بتن به علت از هم گسیختگی برشی بتن اطراف میلگرد (Pullout) و شکافته شدن بتن به علت گسیختگی کلی بتن (Splitting). مود حالت اول در بتنی که محصور شده است و مود حالت دوم در بتن غیر محصور رخ می‌دهد (به دلیل نبودن جزء مقاوم در برابر نیروهای برشی و کم بودن ظرفیت کششی بتن). عدم محصورشدگی، تنش پیوستگی حداکثر را، تا ۴۰ درصد تنش حالت محصورشده، کاهش می‌دهد. در لغزش متناظر با تنش حداکثر نیز این افت مشهود است. به این صورت که این لغزش حدود ۱۵ تا ۳۰ درصد لغزش حالت محصور شده است.

۲) تنش پیوستگی و به همان تناسب نیروی مقاوم میلگرد در برابر لغزش در حالت محصور نشده حدود ۴۰ درصد کمتر از حالت محصور شده است (در حالت یکسان بودن مساحت میلگردهای مورد بررسی).

۳) بیشترین تنش پیوستگی با توجه به مؤلفه‌های مختلف متفاوت است، ولی لغزش متناظر با این تنش، در محدوده ۱/۴ تا ۲

میلی‌متر برای بتن محصور شده و حدود ۰/۲۵ تا ۰/۴۵ میلی‌متر برای بتن محصور نشده است؛ یعنی لغزش متناسب با تنش حداکثر در حالت محصور نشده حدود ۱۳ تا ۳۲ درصد حالت محصور شده است (با توجه به سایر مؤلفه‌های مؤثر).

۴) مقاومت فشاری بتن، اثری مستقیم و قابل توجه بر رفتار میلگرد دارد. با افزایش مقاومت بتن، تنش پیوستگی افزایش می‌یابد، اما این افزایش به صورت خطی نیست و با جذر مقاومت فشاری بتن رابطه دارد. رابطه ارایه شده می‌تواند تنش پیوستگی میلگرد مدفون در یک بتن با مقاومت مشخص را به تنش بتن با مشخصات دیگری تبدیل کند. این مورد، در محدود مقاومت فشاری بتنی تا حدود ۵۷ مگاپاسکال صحیح است، اما در بتن‌های پرمقاومت، ممکن است صحیح نباشد.

۵) قطر میلگرد دومین پارامتر تاثیرگذار در پیوستگی میلگرد است. البته اثر آن از مقاومت بتن کمتر است. با افزایش قطر میلگرد، پیوستگی کاهش پیدا می‌کند و تنش پیوستگی حداکثر کمتر می‌شود. طبق محاسبات، این دو مؤلفه رابطه معکوس دارند و با دقت مناسبی هم رابطه آنها خطی است. با رابطه ارایه شده می‌توان با دانستن تنش پیوستگی یک قطر میلگرد، تنش پیوستگی قطر دیگری را محاسبه نمود (با فرض یکسان بودن مقاومت فشاری). خطای حاصل از این رابطه کمتر از ده درصد است.

۶) کششی یا فشاری بودن نیروی وارد بر میلگرد بر نتایج تاثیرگذار است. از آنجا که زلزله ماهیت رفت و برگشتی دارد، باید به این مسئله توجه نمود. طبق محاسبات، وضعیت در حالت کششی بحرانی‌تر است و تنش پیوستگی حداکثر، بسته به قطر میلگرد تا حدود ۱۰ درصد کمتر است.

مراجع

- [1] R. Eligehausen, V. Ciampi and V. Bertero, "Analytical model for deformed-bar bond under generalized excitations," *Transactions of IABSE Colloquium on Advanced Mechanics of Reinforced Concrete*, 1981.
- [2] R. Elingehausen, E. Popov and V. Bertero, "Local bond stress-slip relationships of deformed bars under generalized excitations,"

- Texas at Austin, 1975.
- [16] Darwin, McCabe, Idun and Schoenekase, "Development Length Criteria: Bars Not Confined by Transverse Reinforcement," *ACI Structural Journal*, vol. 89, no. 6, pp. 709-720, 1992.
- [17] Zuo and Darwin, "Splice Strength of Conventional and High Relative Rib Area Bars in Normal and High-Strength Concrete," *ACI Structural Journal*, vol. 97, no. 4, pp. 630-641, 2000.
- Earthquake engineering research center , Report No. UCB/EERC-83/23, 1983.
- [3] H. Shima, L.-L. Chou and H. Okamura, "Micro and Macro Models for Bond in Reinforced Concrete," *Journal of the faculty of engineering, The university of Tokyo*, vol. xxxix, no. 2, pp. 133-194, 1987.
- [4] C. E. -. I. D. Beton, CEB - FIP model code, 1990.
- [5] Alsiwat and Saatcioglu, "Reinforcement anchorage slip under monotonic loading," *Struct. Eng.*, vol. 118, 1992.
- [6] M. Haskett, D. John Oehlers and M. Ali, "Local and global bond characteristics of steel reinforcing bars," *Engineering Structures*, no. 30, pp. 376-383, 2008.
- [7] M. Valcuende and C. Parra, "Bond behaviour of reinforcement in self-compacting concretes," *Construction and Building Materials*, no. 23, p. 162-170, 2009.
- [8] I. F. f. S. Concrete, fib Model Code for Concrete Structures, Wilhelm Ernst & Sohn, Verlag für Architektur, 2010.
- [9] B. Zho, R. Wu and J. Feng, "Two models for evaluating the bond behavior in pre- and post-yield phases of reinforced concrete," *Construction and Building Materials*, no. 147, pp. 847-857, 2017.
- [10] C. E. -. I. D. BETON, CEB - FIP model code, 1990.
- [11] A. C. 318, "Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318M-19) and Commentary (ACI 318RM-19)," American Concrete Institute, 2019.
- [12] A. C. 408, "ACI 408R-03 , Bond and Development of Straight Reinforcing Bars in Tension," 2003.
- [13] A. J. Bigaj, "Structural dependence of rotation capacity of plastic hinges in RC beams and slabs," in *PhD thesis*, 1999.
- [14] A. Bigaj, "Bopd beHavlour of deformed bars in NSC and HSC," Delft University of Technology, 1995.
- [15] C. O. Orangun, J. O. Jirsa and a. Breen, "The Strength of Anchored Bars: A Reevaluation of Test Data on Development Length and Splices," *Research Report No. 154-3F, Center for Highway Research, The University of*

Evaluation of effective parameters in bonding strength of bars in reinforced concrete with insufficient development length in pullout test

F. Farahbod¹, A. Shahrabi Farahani²

1. Associate Professor of structural engineering, Road, Housing and Urban development research center (BHRC)
2. Ph.D. Student of earthquake engineering, Road, Housing and Urban development Research center (BHRC)

F.farahbod@bhrc.ac.ir

Abstract

The performance of steel rebars in reinforced concrete is always complicated and important. Each reinforced concrete element contains two parts, including concrete and steel rebars. Under severe forces, the behavior of reinforced concrete structures and their elements is dependent on the interaction between steel and concrete. Due to the composite nature of these structures, their performance is complex and might be studied in different aspects. Incorrect evaluation of this item will lead to the wrong design. Although this performance affects all parts of a concrete structure, development length and lap splice are the most significant parts. One of the common tests, in evaluating the steel reinforcing bars' performance, is the pullout test, however, there are deficiencies in different investigations. In this research, five pullout specimens were tested, containing four specimens with confined and one with unconfined concrete, which had three different bar sizes including 20, 22, and 25 mm. Tests were conducted on 300 mm cube specimens and 250 mm development length of steel rebars which was insufficient. Rebars with sufficient development length have a different performance. The testing method was monotonic and the compressive strength of concrete was 23 MPa. Normally two cracking and damaging mechanism is observed. It is pullout of rebar or splitting of concrete. In confined concrete pullout occurs, while in an unconfined specimen, splitting of the concrete takes place so the bonding strength and axial force tend to zero much faster. Using these results and results from other researches, some important parameters in the field of bonding and slippage of rebars, including compressive strength of concrete, rebar size, force direction (pulling or pushing), and confinement of concrete were investigated and some equations with high accuracy were proposed to generalize available results to desired results. For verifying and increasing the range of results, three valid kinds of research are used, which confirm the accuracy of results and equations. This study showed that the bonding strength would increase 20 percent by 50 percent increase in compressive strength of concrete. Moreover, by changing the bar diameter from 20 to 22 and 25 mm, for a constant compressive strength of concrete, bonding strength decreases 4.3 and 10.6 percent respectively. By using the proposed equation, maximum bond strength for different bar sizes may be evaluated. Besides, maximum bond strength is reduced up to 40 percent of a confined specimen, and the slippage corresponding to maximum bond strength is reduced 15 to 30 percent as the result of using unconfined concrete. In the same way, for the same bar diameter, pullout force reduced up to 40 percent. The slippage corresponded to maximum bonding strength is about 1.4 to 2 mm for confined concrete and 0.25 to 0.45 mm for unconfined concrete. Bond strength and slippage of rebars vary in compressive and pulling forces. This is due to the axial behavior of the rebar's head in compression. The compressive axial force of the bar may increase the bonding strength up to 10 percent, comparing to pulling axial force.

Keyword: bonding of concrete to bar, slippage of bars, confined concrete, bonding strength vs slippage diagram