



ارزیابی آزمایشگاهی مقاومت باند بین میلگرد و بتن حاوی پودر سنگ آهک

سید عباس حسینی^۱، صادق اعتدالی^۲

^۱ استادیار، دانشکده صنعت و معدن چرام، دانشگاه یاسوج، چرام، ایران
^۲ دانشیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی بیرجند، بیرجند، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۸-۰۲-۲۱
بازنگری: ۱۳۹۸-۰۲-۳۰
پذیرش: ۱۳۹۸-۰۳-۰۲
ارائه آنلاین: ۱۳۹۸-۰۳-۲۷

کلمات کلیدی:

تکنولوژی بتن
مقاومت باند
پودر سنگ آهک
مقاومت فشاری
آزمایش بیرون کشیدن

خلاصه: مقدار چسبندگی بین بتن و میلگردهای مسلح کننده نقش تعیین کننده‌ای در رفتار سازه‌های بتن مسلح و همچنین مود شکست آنها دارد. این چسبندگی که تحت عنوان مقاومت باند شناخته می‌شود، اکثراً توسط پیوستگی مهاری تامین می‌شود و می‌تواند به واسطه تغییر ترکیبات بتن دستخوش تغییر گردد. مقاله حاضر به ارزیابی آزمایشگاهی مقاومت باند بین میلگرد و بتن حاوی پودر سنگ آهک پرداخته است. برای این منظور، مقادیر ۵، ۱۵ و ۳۰ درصد سیمان نمونه‌ها در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه بدست آمده است. در این تحقیق از نمونه‌های مکعبی با ابعاد ۱۵ سانتیمتر و میلگرد با قطر ۱۶ میلیمتر برای ارزیابی باند استفاده شده است. نسبت آب به سیمان ثابت و برابر با ۰/۴ در نظر گرفته شده است. همچنین مقدار مقاومت باند بین بتن و میلگرد از طریق آزمایش بیرون کشیدن میلگرد محاسبه شده است. نتایج کلی نشان می‌دهند که مقاومت باند با افزایش درصد سنگ آهک در بتن کاهش می‌یابد، مقدار این کاهش برای نمونه با ۵ درصد پودر سنگ آهک کمتر از ۱۰ درصد و برای نمونه با ۳۰ درصد پودر سنگ آهک تقریباً ۴۰ درصد بدست آمده است. همچنین ارزیابی مدل‌های موجود برای پیش بینی مقاومت باند نشان می‌دهد که این مدل‌ها مقاومت باند بزرگتری نسبت به نتایج آزمایشگاهی ارائه می‌دهند که در جهت خلاف اطمینان است. لذا ارائه یک مدل مناسب برای تخمین مقاومت باند نمونه‌های بتنی حاوی پودر سنگ آهک ضرورت می‌یابد.

۱- مقدمه

از: کاهش مصرف سیمان، کاهش سرعت و میزان حرارت هیدراسیون، افزایش مقاومت بتن، افزایش پایداری بتن. سنگ آهک که خود یکی از مواد اولیه برای تولید کلینکر سیمان است از جمله اولین موادی بود که جایگزین درصدی از سیمان مورد استفاده در بتن شد [۱]. پودر سنگ آهک معمولاً یا در مرحله تولید سیمان به کلینکر و یا در هنگام تهیه مخلوط بتنی به سیمان افزوده می‌شود [۲]. با افزایش تحقیقات، استانداردها و آیین‌نامه‌ها نیز دستورالعمل‌های استفاده از این نوع ترکیب سیمانی را ارائه دادند، به عنوان مثال آیین‌نامه اروپا دو نوع سیمان با مقادیر ۶ تا ۲۰ درصد و ۲۱ تا ۳۵ درصد سنگ آهک را به عنوان سیمان پرتلند سنگ آهکی (PLC) ارائه کرده است [۳].

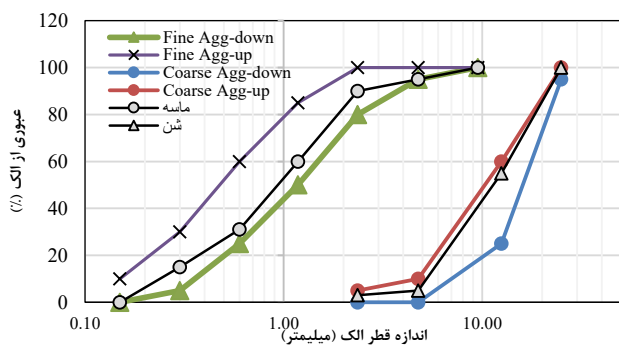
استفاده روز افزون از سیمان به عنوان ماده چسباننده در بتن، موجب افزایش مصرف انرژی و منابع و در عین حال افزایش تولید مواد مضر برای محیط زیست مانند گازهای گلخانه‌ای شده است. از سال‌های گذشته، با توجه بیشتر به مفاهیم توسعه پایدار، امکان جایگزینی مقداری از سیمان با مواد دیگری که بتوانند هم قابلیت سیمان را داشته باشند و هم منجر به کاهش اثرات زیست محیطی گردند، مورد توجه قرار گرفته است. مواد جایگزین سیمان به منظور تامین یک یا چند خاصیت به بتن اضافه می‌شوند؛ این خواص عبارتند

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: a.hosseini@yu.ac.ir



جدول ۱. خواص فیزیکی و شیمیایی سیمان و پودر سنگ آهک
Table 1. Physical and chemical properties of cement and limestone powder

ترکیبات شیمیایی (%)								خواص فیزیکی		ماده
CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₃	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	چگالی (kg/m ³)	بلین (m ² /kg)	
۶۳/۲	۲۲/۶	۴/۱	۳/۵	۱/۵	۲/۶	۰/۲	۰/۵	۲۹۰۰	۳۱۰	سیمان
۶۱/۵	۱/۲	۰/۶	۰/۷	۰/۲	۲/۲	۰/۱	۰/۱	۲۶۵۰	۳۳۰	پودر سنگ آهک



شکل ۱. دانه بندی مصالح سنگی.

Fig. 1. The particle size distribution of aggregates

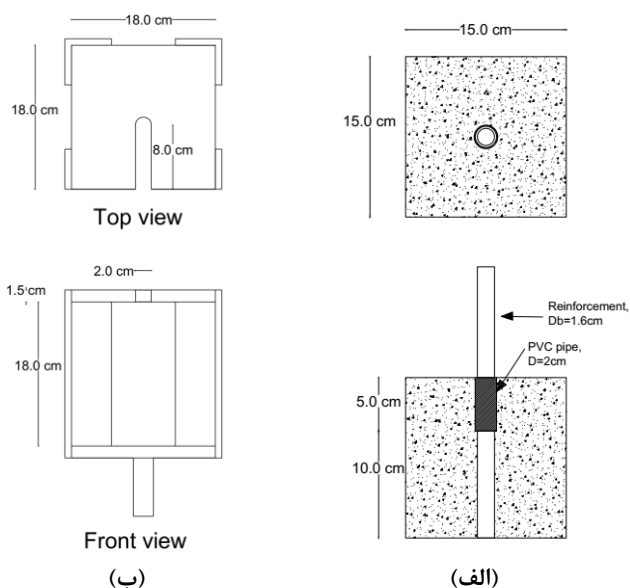
تامین می‌شود. مقاومت باند به وسیله سه مکانیزم اتصال شیمیایی، اصطکاک و پیوستگی مهاری به وجود می‌آید [۱۶]. پوشش بتن، قطر میلگرد، محصورشدگی، طول مهاری و مقاومت فشاری بتن مهمترین پارامترهای تاثیر گذار بر مقاومت باند هستند [۱۷، ۱۸]؛ نحوه اثر مقاومت فشاری بتن بر مقاومت باند به صورت‌های مختلفی از توان مقاومت فشاری مانند $f_c^{0.25}$ ، $f_c^{0.5}$ ، $f_c^{0.75}$ و f_c بیان شده است [۱۹، ۲۰]. از این‌رو هر عاملی که بر مقاومت فشاری اثرگذار است، باید در محاسبات مربوط به مقاومت باند در نظر گرفته شود. علیرغم وجود تحقیقات زیاد درباره اثرات جایگزینی سیمان بر سنگ آهک، مطالعات اندکی درباره اثر آن بر مقاومت باند وجود دارد، لذا در این مقاله اثر جایگزینی سیمان با مقادیر ۵، ۱۵ و ۳۰ درصد پودر سنگ آهک بر مقاومت باند مورد ارزیابی آزمایشگاهی قرار گرفته است. درصد‌های جایگزینی بر اساس منابع قبلی به گونه‌ای انتخاب شده است که هم بازه عدم تاثیر پودر سنگ آهک بر مقاومت فشاری بتن (۵ درصد) و هم بازه دارای تاثیرات منفی بر مقاومت فشاری بتن (۱۵ و ۳۰ درصد) را شامل شوند. مطالعات ارزیابی مقدار مقاومت باند و مقاومت فشاری

خواص مقاومتی از قبیل مقاومت فشاری، کششی و مدول الاستیسیته به همراه پارامترهای موثر در دوام این نوع سیمان‌ها مورد بررسی آزمایشگاهی بسیاری از محققین قرار گرفته است [۴-۶]. اثرات سنگ آهک بر رفتار بتن به مقدار، نرمی و نحوه ترکیب آن با سیمان وابسته است [۷]. رمضان پور و همکاران نشان دادند که افزایش تا ۱۰ درصد جایگزینی سیمان با سنگ آهک تاثیر مخربی بر مقاومت فشاری بتن ندارد [۸]. محمدی و سوئت با جایگزینی ۵ تا ۱۲ درصد سیمان با سنگ آهک نیز نتایج مشابهی را ارائه دادند [۹]. در مجموع در مقادیر کمتر از ۱۵ درصد، بیشتر گزارش‌ها حاکی از عدم تاثیر منفی جایگزینی سیمان با سنگ آهک بوده است [۱۰، ۱۱]. در این بازه، افزایش مقاومت در نمونه‌های با سن پایین نیز مشاهده شده است که این امر اکثراً به افزایش نرخ هیدراسیون و تولید کربو آلومینات‌های کلسیم نسبت داده شده است [۱۲، ۱۳]. با افزودن بیشتر مقدار پودر سنگ آهک، اکثر محققین کاهش در مقاومت بتن را گزارش کرده‌اند. لولینی و همکاران برای بتن حاوی ۳۰ درصد سنگ آهک، کاهش ۳۰ درصد مقاومت فشاری ۲۸ روزه نسبت به نمونه شاهد را گزارش کرده‌اند [۱۴]. کاهش مقاومت با افزایش مقدار سنگ آهک به رقیق شدن مقدار سیمان در مخلوط به واسطه جایگزینی با سنگ آهک نسبت داده شده است، یعنی در این حالت سنگ آهک بیشتر نقش یک پرکننده (فیلر) را در ترکیب دارد [۱۵]. در مجموع می‌توان بیان داشت که توازن بین کاهش اثرات زیست محیطی و ایجاد بتنی با حد قابل قبول مقاومت و دوام در استفاده از پودر سنگ آهک به عنوان جایگزین بخشی از سیمان، باید مورد توجه قرار گیرد.

رفتار سازه‌های بتن مسلح به عملکرد مشترک میلگردهای فولادی و بتن وابسته است، این عملکرد مشترک به واسطه چسبندگی میلگرد و بتن که مقاومت باند نامیده می‌شود، در طول مهاری میلگرد

جدول ۲. مشخصات نمونه‌های بتنی ساخته شده.
Table 2. Mixture proportions of the concrete samples

شماره شن	ماسه	w/b	w/c	پودر سنگ آهک (kg/m ³)	سیمان (kg/m ³)	آب (kg/m ³)	نمونه
۱۱۷۵	۶۰.۲	۰.۴	۰.۴۲	۱۷/۵	۳۳۲/۵	۱۴۰	LS05
۱۱۳۸	۶۰.۲	۰.۴	۰.۴۷	۵۲/۵	۲۹۷/۵	۱۴۰	LS15
۱۰۴۸	۶۰.۲	۰.۴	۰.۵۷	۱۰۵	۲۴۵	۱۴۰	LS30
۱۱۹۱	۶۰.۲	۰.۴	۰.۴	۰	۳۵۰	۱۴۰	Control



شکل ۲. طرح شماتیک، (الف) نمونه‌های ساخته شده برای آزمایش باند، (ب) جعبه قرار گیری نمونه‌های آزمایش باند
Fig. 2. Schematic sketch, (a) Samples made for pull-test, (b) Steel box for pull-out test bond

قالب‌های مکعبی استاندارد ۱۵ سانتیمتری استفاده شد و نمونه‌ها پس از قالب‌گیری به مدت ۲۴ ساعت در دمای اتاق زیر پوشش پلاستیک جهت حفظ رطوبت نگهداری شده و بعد از خارج کردن از قالب‌ها درون آب با دمای ۲۰ درجه طبق استاندارد ASCM C192 تا زمان انجام آزمایشات (۷، ۲۸ و ۹۰ روز) نگهداری شده اند.

آزمایش بیرون کشیدن میلگرد بر اساس استاندارد RILEM RC6.128-11-7 انجام گرفته است. به منظور انجام آزمایش مقاومت باند، به فاصله ۱۰ سانتیمتر از انتهای میلگرد، یک لوله پی وی سی به طول ۵ سانتیمتر بر روی میلگرد قرار داده می‌شود تا در قسمت بالایی نمونه ساخته شده به اندازه طول لوله، اتصالی بین میلگرد و

بر روی نمونه‌های مکعبی در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه انجام شده است.

۲- برنامه آزمایشگاهی

۲-۱- مواد و مصالح

مصالح استفاده شده در این تحقیق شامل سنگدانه‌ها، سیمان، پودر سنگ آهک و آب است. سیمان استفاده شده، سیمان تیپ II کارخانه سیمان شیراز است که نتایج آزمایش XRF آن به همراه پودر سنگ آهک در جدول (۱) آورده شده است. سنگدانه‌ها نیز از معادن غرب شیراز تهیه شده که دانه‌بندی آن بعد از اصلاح در شکل ۱ نشان داده شده است.

۲-۲- آماده سازی نمونه‌ها

طرح اختلاط‌ها بر اساس استاندارد ACI و نسبت آب به ترکیب سیمانی (w/b) ثابت و برابر با ۰/۴ در نظر گرفته شده است. در این تحقیق، پودر سنگ آهک به نسبت‌های ۵، ۱۵ و ۳۰ درصد به صورت جداگانه جایگزین سیمان می‌شود. برای هر ترکیب، ۱۸ نمونه ساخته شد که از این تعداد ۹ نمونه برای انجام آزمایش باند و ۹ نمونه برای آزمایش مقاومت فشاری مورد استفاده قرار گرفت، نمونه‌ها در شرایط استاندارد، عمل‌آوری شده و آزمایشات برای نمونه‌ها در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روز پس از ساخت انجام می‌پذیرد. تعداد آزمایشات انجام گرفته در مجموع ۷۲ مورد می‌باشد. نمونه شاهد که فاقد پودر سنگ آهک است نیز تحت آزمایش قرار می‌گیرد. مقدار ترکیبات مختلف تشکیل دهنده نمونه‌ها در جدول ۲ نشان داده شده است. به منظور حفظ کارایی بتن، مقدار اسلالمپ آن با اضافه کردن فوق روان کننده در محدوده ۱۰ سانتیمتر نگه داشته شده است. برای ساخت نمونه‌ها ار



(ج)



(ب)



(الف)

شکل ۳. آماده سازی نمونه‌های برای آزمایش Pull out به همراه جعبه ساخته شده
Fig. 3. Samples for the pull-out test and the test box



شکل ۴. آزمایش Pull out
Fig. 4. The pull-out test

بتن وجود نداشته باشد. این فاصله به منظور حذف تاثیرات فشار ایجاد شده بر روی نمونه در طی آزمایش بر مقاومت باند در نظر گرفته شده است. در شکل ۲ (الف) مشخصات ابعادی نمونه‌های ساخته شده برای مقاومت باند نشان داده شده است. برای بیرون کشیدن میلگردها از درون بتن از دستگاه ۶۰ تن کشش میلگرد استفاده شد و برای قرار دادن نمونه‌ها درون دستگاه کشش، یک جعبه فلزی با مشخصات ابعادی نشان داده شده در شکل ۲ (ب) استفاده گردید. نمونه ساخته شده این جعبه در شکل ۳ (ج) نشان داده شده است. نحوه قرارگیری نمونه‌ها جهت انجام آزمایش بیرون کشیدن میلگرد، در شکل ۴ نشان داده شده است.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- مقاومت فشاری

نتایج عددی میانگین مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی در سنین مختلف در جدول ۳ نشان داده شده است. با توجه به اینکه در هر سن، ۳ آزمایش انجام شد، بازه توزیع این نتایج نیز در شکل ۵ نشان داده شده است. همانطور که از این نتایج مشخص است، اضافه کردن پودر سنگ آهک مخصوصاً در مقادیر بالا باعث کاهش مقاومت فشاری نمونه‌ها شده است. در نمونه‌های حاوی تنها ۵ درصد سنگ آهک، مقاومت فشاری تفاوت چندانی با نمونه شاهد (Control) ندارد و حتی در ۷ روز، مقاومت فشاری بیشتری بدست آمده است که این اثر را می‌توان به افزایش هیدراسیون سیمان و اثر فزاینده آن نسبت به رقیق شدگی سیمان نسبت داد. در مقادیر بیشتر جایگزینی،

جدول ۳. نتایج آزمایش مقاومت فشاری
Table 3. Compressive strength

مقاومت فشاری (مگاپاسکال)			نمونه
۹۰ روز	۲۸ روز	۷ روز	
۴۳/۵	۳۸/۶	۲۸/۳	LS05
۳۷/۶	۳۳/۹	۲۵/۶	LS15
۳۱/۲	۲۸/۴	۲۱/۲	LS30
۴۴	۳۹/۲	۲۸/۱	Control

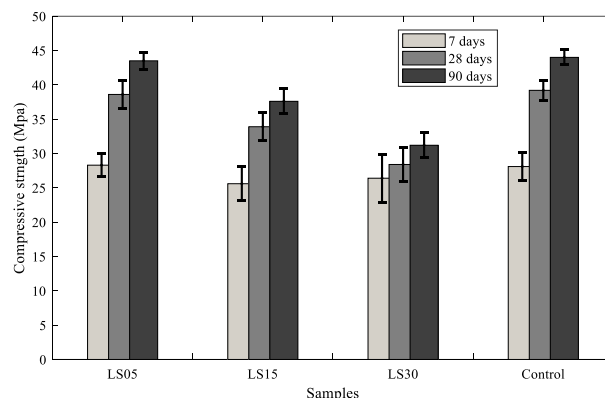
شدت اثر رقیق شدگی سیمان بیشتر بوده و بنابراین موجب کاهش مقاومت فشاری شده است. از شکل ۵ نیز مشخص است که پراکندگی نتایج در سنین پایین برای همه نمونه‌ها بیشتر بوده است و همچنین

مقاومت باند به نمونه شاهد در تمام سنین تقریباً ۰/۶ می‌باشد. این درصد برای نمونه با جایگزینی ۱۵ درصد پودر سنگ آهک تقریباً برابر با ۰/۷ بدست آمده است. هر چند در سن هفت روزه تفاوت چندانی بین مقاومت باند نمونه با ۵ درصد پودر سنگ آهک و نمونه شاهد مشاهده نمی‌شود، ولی مقاومت باند این نمونه در سنین ۲۸ و ۹۰ روزه نسبت به نمونه شاهد متناظر به ترتیب حدود ۲۰ و ۱۰ درصد کاهش یافته است.

به منظور مقایسه با نتایج سایر محققین و مدل‌های موجود، برخی از کاربردی‌ترین مدل‌های پیش‌بینی‌کننده مقاومت باند در جدول ۵ آورده شده است. مقاومت باند در این مدل‌ها بر اساس مقاومت فشاری در هر زمان ارائه شده است؛ از اینرو با جایگذاری نتایج مقاومت فشاری که در جدول ۳ ارائه شده است؛ مقاومت باند برای مدل‌ها حساب شده و با نتایج بدست آمده از آزمایش مقایسه گردیده‌اند. در شکل ۶ این نتایج ترسیم شده‌اند. قابل توجه است که در مدل‌های شماره ۱ تا ۴ جدول ۵، مقاومت فشاری بر اساس مقاومت نمونه استوانه‌ای است؛ بنابراین مقادیر جدول ۴ قبل از اعمال در روابط، به مقاومت نمونه استوانه‌ای تبدیل گردیده‌اند.

از شکل ۶ مشخص است که در سن ۷ روزه، مقاومت باند بدست آمده از آزمایش با افزایش پودر سنگ آهک از نتایج مدل‌ها کمتر می‌شود و به سمت حداقل بدست آمده از مدل‌ها میل می‌کند و حتی برای نمونه LS30 مقاومت باند کمتر از مقادیر محاسبه شده برای همه مدل‌هاست. در سن ۷ روزه همچنین مشاهده می‌شود که نتایج حاصل از آزمایش برای همه نمونه‌ها کمتر از مقدار میانگین مدل‌هاست. برای نمونه شاهد، از این شکل‌ها مشخص است که در سنین ۲۸ و ۹۰ روزه مقاومت باند از مقادیر اکثر مدل‌های ارائه شده بیشتر است که این می‌تواند به دلیل در نظر گرفتن عدم قطعیت و ارائه محافظه کارانه این مدل‌ها باشد؛ برای این نمونه و LS05 در سنین بالا نتایج از میانگین مدل‌ها بالاتر است. برای نمونه‌های LS15 و LS30 مشاهده می‌شود که در تمام سنین مقاومت باند بدست آمده از آزمایش از نتایج اکثر مدل‌ها کمتر است به طوری که نتایج آزمایشگاهی کمتر از مقدار میانگین مدل‌ها است؛ از اینرو استفاده از این مدل‌ها (بجز مدل شماره ۳) برای نمونه‌های با درصد بالای سنگ آهک توصیه نمی‌شود.

شکل ۶ (الف) نشان می‌دهد در صورت عدم حضور پودر سنگ



شکل ۵. مقاومت فشاری نمونه در سنین مختلف و پراکندگی نتایج.
Fig. 5. Compressive strength of samples at different ages and dispersion of results

جدول ۴. نتایج آزمایش مقاومت باند
Table 4. Bond strength

نمونه	مقاومت فشاری (مگاپاسکال)		
	روز ۷	روز ۲۸	روز ۹۰
LS05	۸/۲	۱۱/۱	۱۳/۲
LS15	۶/۲	۹/۵	۱۰/۶
LS30	۵/۰	۸/۱	۸/۷
Control	۸/۴	۱۳/۵	۱۴/۹

با افزایش مقدار پودر سنگ آهک بر پراکندگی نتایج اضافه شده است.

۳-۲- مقاومت باند

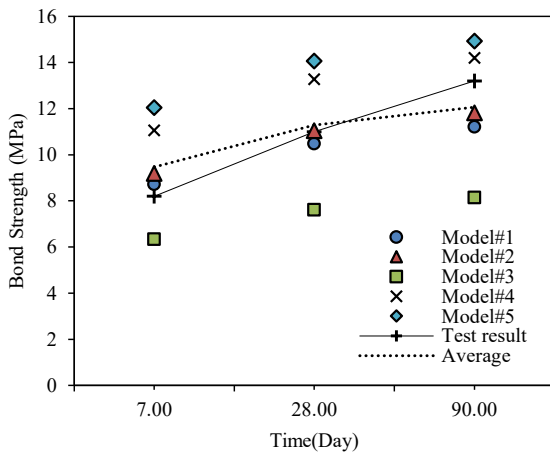
نتایج حاصل از آزمایش بیرون کشیدن میلگرد (Pull out) در جدول ۴ آورده شده است. برای محاسبه مقاومت باند، نیروی حاصل از آزمایش بر سطح درگیر میلگرد با بتن تقسیم شده است. بدین منظور از رابطه زیر استفاده شده است:

$$\tau_u = \frac{F}{\pi L_d d_b} \quad (1)$$

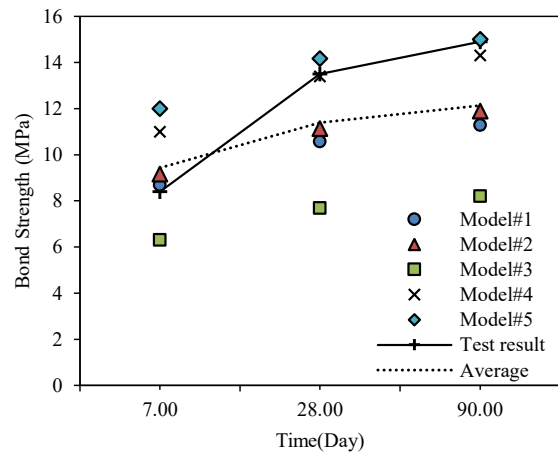
در این رابطه، F ، حداکثر نیروی بدست آمده برای بیرون کشیدن میلگرد، d_b ، قطر میلگرد و L_d طول میلگرد در تماس با بتن است که در این تحقیق برابر با ۱۰ سانتیمتر در نظر گرفته شد. بر اساس نتایج حاصله مشاهده می‌گردد که مقاومت باند همانند مقاومت فشاری با افزایش درصد پودر سنگ آهک دچار کاهش شده است. برای نمونه با جایگزینی ۳۰ درصد پودر سنگ آهک مشاهده می‌شود که نسبت

جدول ۵. برخی مدل‌های موجود برای ارزیابی مقاومت باند
Table 5. Some available models to evaluate the bond strength

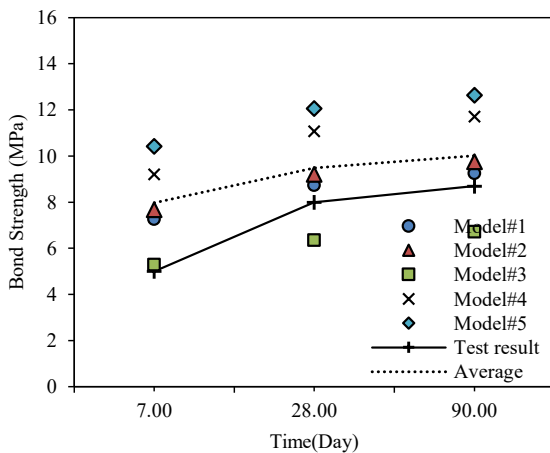
مرجع	مدل	شماره مدل
[۲۱]	$\tau_u = 0.083045\sqrt{f_c'} \left[1.2 + 3 \left(\frac{c}{d_b} \right) + 50 \left(\frac{d_b}{L_d} \right) \right]$	۱
[۲۲]	$\tau_u = 0.083045\sqrt{f_c'} \left[\left(1.06 + 2.12 \left(\frac{c}{d_b} \right) \right) + \left(0.92 + .08 \left(\frac{C_{max}^*}{C_{min}} \right) + 75 \left(\frac{d_b}{L_d} \right) \right) \right]$	۲
[۲۳]	$\tau_u = 0.083045\sqrt{f_c'} \left[22.8 - 0.208 \left(\frac{c}{d_b} \right) - 38.212 \left(\frac{d_b}{L_d} \right) \right]$	۳
[۲۴]	$\tau_u = 8.6 \left(\frac{\frac{c}{d_b} + 5.5}{\frac{c}{d_b} + 5.5} \right) f_{ct}$	۴
[۱۹]	$\tau_u = \sqrt{f_c'} \left[0.1377 + 0.1539 \left(\frac{c}{d_b} \right) + 2.673 \left(\frac{d_b}{L_d} \right) + 1.053 \left(\frac{h_r}{s_r} \right) \right]$	۵



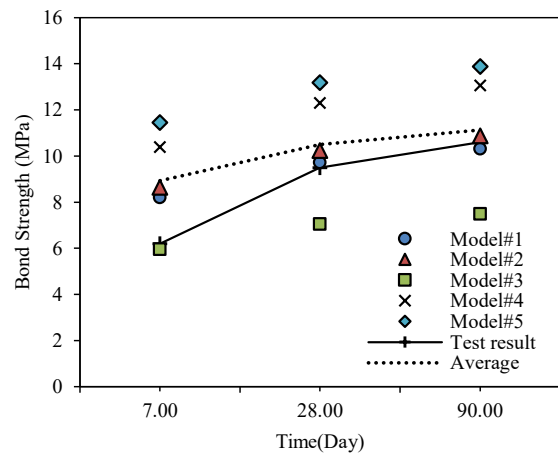
LS۰۵ نمونه (ب)



الف) نمونه شاهد



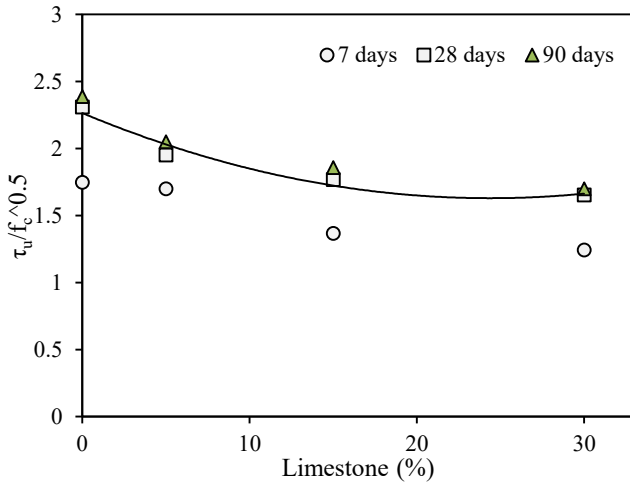
LS۳۰ نمونه (ت)



پ) نمونه LS۱۵

شکل ۶. مقایسه نتایج مقاومت باند بدست آمده از آزمایش با مدل‌های موجود

Fig. 6. Comparison of bond strength results obtained from the test with existing models, (a) control sample, (b) LS05, (c) LS15, (d) LS30



شکل ۷. رابطه بین تنش باند و درصد پودر سنگ آهک
 Fig. 7. Relationship between bond stress and the percentage of limestone powder

گرفت و با نتایج مدل‌های موجود برای تخمین مقاومت باند بین میلگرد و بتن مقایسه گردید. اثر جایگزینی سیمان با مقادیر ۵، ۱۵ و ۳۰ درصد پودر سنگ آهک بر مقاومت باند مورد ارزیابی آزمایشگاهی قرار گرفت. مطالعات ارزیابی مقدار مقاومت باند و مقاومت فشاری بر روی نمونه‌های مکعبی در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه انجام شد و در مجموع نتایج زیر حاصل گردید:

۱- با افزایش پودر سنگ آهک، چسبندگی بتن و میلگرد کاهش یافته و مقاومت باند کم می‌شود. این کاهش در مقادیر بالا مثل ۳۰ درصد جایگزینی زیاد است. دلیل این امر غلبه کردن اثر رقیق‌شدگی سیمان به دلیل جایگزینی با پودر سنگ آهک بر سایر اثرات فیزیکی و احیاناً شیمیایی مفید ناشی از اضافه کردن سنگ آهک است.

۲- جایگزینی ۵ درصد پودر سنگ آهک در دراز مدت باعث کاهش تنها ۱۰ درصدی مقاومت باند شده است، بنابراین استفاده از این مقدار پودر سنگ آهک برای جایگزینی با سیمان چندان اثرات مخربی بر عملکرد سازه‌ای از این منظر ندارد.

۳- مدل‌های موجود برای پیش‌بینی مقاومت باند برای بتن‌های حاوی درصد‌های بالای سنگ آهک، نتایج درستی ارائه نمی‌دهند، به طوری که این مدل‌ها مقاومت باند بزرگتری نسبت به نتایج آزمایشگاهی ارائه می‌دهند که در جهت خلاف اطمینان است. لذا ارائه یک مدل مناسب برای تخمین مقاومت باند نمونه‌های بتنی حاوی پودر سنگ آهک جایگزین سیمان ضرورت می‌یابد.

۴- در میان مدل‌های پیشنهادی مورد مطالعه و با ملحوظ نمودن

آهک (نمونه شاهد)، مدل‌های شماره ۱ و ۲ تخمین مناسب‌تری از مقاومت باند را در سن ۷ روزه نمونه‌ها ارائه می‌دهند. همچنین مشاهده می‌شود که در سنین ۲۸ و ۹۰ روز، تخمین مقاومت باند با بهره‌گیری از مدل ۵ مطابقت بیشتری با نتایج آزمایشگاهی فراهم می‌آورد. نتایج بدست آمده برای نمونه‌های بتنی ۷ روزه نشان می‌دهند که با افزایش پودر سنگ آهک، مقاومت باند بدست آمده از نتایج آزمایشگاهی از مقادیر حاصل از اکثر مدل‌های پیشنهاد شده (بجز مدل شماره ۳) کمتر است. در این حالت استفاده از مدل شماره ۳ تطابق بیشتری با نتایج مطالعات آزمایشگاهی نشان می‌دهد. اگر چه مدل‌های شماره ۱ و ۲ مدل‌های مناسبی برای تخمین مقاومت باند در نمونه‌های حاوی پودر سنگ در سنین ۲۸ روزه می‌باشند و تطابق بیشتری با نتایج مطالعات آزمایشگاهی دارند، لیکن مشاهده می‌شود که در سنین فوق، مقاومت باند بدست آمده از آزمایش کمتر از مقدار میانگین مدل‌ها است. در یک نتیجه‌گیری کلی و با ملحوظ نمودن اثرات عدم قطعیت و ارائه یک مدل محافظ کارانه تر، مدل شماره ۳ می‌تواند برای تخمین محافظه کارانه مقاومت باند برای نمونه‌های حاوی پودر سنگ مناسب باشد.

مقاومت باند در مدل‌های جدول ۵ بر اساس مجذور مقاومت فشاری ارائه شده است، به منظور بررسی دقیق‌تر اثر درصد پودر سنگ آهک بر مقاومت باند، مقادیر مقاومت باند حاصل از مطالعات آزمایشگاهی بر $\sqrt{f_c}$ متناظر آن‌ها تقسیم شده و در شکل ۷ نشان داده شده است. از این شکل مشخص است که با گذشت زمان برای همه درصد‌ها نسبت $\tau_u / \sqrt{f_c}$ افزایش یافته است. همانطور که از این شکل مشخص است، برای مقاومت‌های ۲۸ روزه و ۹۰ روزه با خطای کمی می‌توان رابطه‌ای بر حسب درصد پودر سنگ آهک برای $\tau_u / \sqrt{f_c}$ بدست آورد. برای نتایج حاصل از این تحقیق، رابطه به صورت زیر بدست آمده است:

$$\tau_u / \sqrt{f_c} = 0.0011(LS)^2 - 0.052(LS) + 2.26 \quad R^2 = 0.958 \quad (2)$$

در این رابطه، LS ، مقدار درصد پودر سنگ آهک می‌باشد.

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق مقاومت باند بین میلگرد و بتن برای نمونه‌های بتنی حاوی پودر سنگ آهک جایگزین سیمان مورد آزمایش قرار

mortars: Effect of high volume limestone powder replaced by cement, Construction and Building Materials, 196 (2019) 115-125.

- [5] P. Ghoddousi, J.A. SHIRZADI, M. Lotfi, The effect of amount and several different types of mineral admixtures on the yield stress and plastic viscosity of self-consolidating concretes, (2016).
- [6] A.A. Ramezani pour, E. Ghiasvand, M.E. Kamel, Durability of Concretes and Mortars Containing Limestone Powder Exposed to High Sulfate Environments, Amirkabir Journal of Civil Engineering, 43(2) (2012) 19-25.
- [7] Y. Knop, A. Peled, R. Cohen, Influences of limestone particle size distributions and contents on blended cement properties, Construction and Building Materials, 71 (2014) 26-34.
- [8] A.A. Ramezani pour, E. Ghiasvand, I. Nickseresht, M. Mahdikhani, F. Moodi, Influence of various amounts of limestone powder on performance of Portland limestone cement concretes, Cement and Concrete Composites, 31(10) (2009) 715-720.
- [9] J. Mohammadi, W. South, Effect of up to 12% substitution of clinker with limestone on commercial grade concrete containing supplementary cementitious materials, Construction and Building Materials, 115 (2016) 555-564.
- [10] S. Palm, T. Proske, M. Rezvani, S. Hainer, C. Müller, C.-A. Graubner, Cements with a high limestone content—Mechanical properties, durability and ecological characteristics of the concrete, Construction and building materials, 119 (2016) 308-318.
- [11] R. Hooton, M. Nokken, M. Thomas, Portland-limestone cement: state-of-the-art report and gap analysis for CSA A 3000, report prepared for St. Lawrence Cement, (2007).
- [12] A. Marzouki, A. Lecomte, A. Beddey, C. Diliberto, M.B. Ouezdou, The effects of grinding on the properties of Portland-limestone cement, Construction and Building Materials, 48 (2013) 1145-1155.
- [13] B. Lothenbach, G. Le Saout, E. Gallucci, K. Scrivener, Influence of limestone on the hydration of Portland cements, Cement and Concrete research, 28 (2008) 848-

اثرات عدم قطعیت و ارائه یک مدل محافظ کارانه تر، مدل شماره ۳ می تواند برای تخمین محافظه کارانه مقاومت باند برای نمونه های حاوی پودرسنگ مناسب باشد.

۵- فهرست علائم

علائم انگلیسی

ضخامت پوشش بتن روی میلگرد، m	c
پوشش بتنی میلگرد در کناره ها، m	c_s
فاصله خالص بین میلگردها، m	c_x
پوشش بتنی زیر میلگرد، m	c_y
$m \cdot \max\{\min(c_x, c_s/2), c_y\}$	C_{max}^*
$m \cdot \min(c_x, c_s/2, c_y)$	C_{min}
قطر میلگرد، m	d_b
مقاومت فشاری نمونه استوانه ای بتن، MPa	f_c
مقاومت کششی بتن، MPa	f_{ct}
مقاومت فشاری نمونه مکعبی بتن، MPa	f_{cu}
حداکثر نیروی کششی وارده به میلگرد در آزمایش Pull out قبل از مکانیسم، N	F
طول مهار شده میلگرد در بتن، m	l_d
ارتفاع آج میلگرد، mm	h_r
فاصله مرکز به مرکز آج های میلگرد در راستای طولی، mm	s_r

علائم یونانی

مقاومت باند، MPa	τ_u
------------------	----------

مراجع

- [1] M.S. Meddah, M.C. Lmbachiya, R.K. Dhir, Potential use of binary and composite limestone cements in concrete production, Construction and Building Materials, 58 (2014) 193-205.
- [2] A.M. Diab, A.E.M.A. Elmoaty, A.A. Aly, Long term study of mechanical properties, durability and environmental impact of limestone cement concrete, Alexandria Engineering Journal, 55(2) (2016) 1465-1482.
- [3] E.C.f. Standardization, EN 197-1. Cement—Part 1. Composition, specifications and conformity criteria for common cements, (2012).
- [4] S. Demirhan, K. Turk, K. Ulugerger, Fresh and hardened properties of self consolidating Portland limestone cement

- Bond behavior and assessment of design ultimate bond stress of normal and high strength concrete, Alexandria Engineering Journal 53 (2014) 355-371.
- [20] A.C. 408, Bond and Development of Straight Reinforcing Bars in Tension in: ACI Committee 408, Farmington Hills, 2003.
- [21] C.O. Orangun, I.O. Jirsa, J.E. Breen, A re-evaluation of test data on development length and splices, ACI Journal, 74(3) (1977) 114-122.
- [22] D. Darwin, S.L. Maccab, E.K. Indun, S.P. Scheonekase, Development length criteria; bars not confined by transverse reinforcement, ACI Journal, 89(6) (1992) 709-720.
- [23] M.N.S. Hadi, Bond of high strength concrete with high strength reinforcing steel, The Open Civil Engineering Journal, 2 (2008) 143-147.
- [24] M.R. Esfahani, B.V. Rangan, Bond between normal strength and high-strength concrete (HSC) and reinforcing bars in splices in beams, ACI structural journal, 95(3) (1998) 272-280.
- 859.
- [14] F. Lollini, E. Redaelli, L. Bertolini, Effects of Portland cement replacement with limestone on the properties of hardened concrete, Cement and Concrete Composites, 46 (2014) 32-40.
- [15] Y. Wang, Z. Shui, X. Gao, R. Yu, Y. Huang, S. Cheng, Understanding the chloride binding and diffusion behaviors of marine concrete based on Portland limestone cement-alumina enriched pozzolans, Construction and Building Materials 198 (2019) 207-217.
- [16] S.B. Ka, S.-J. Han, D.H. Lee, S.-H. Choi, Y.-H. Oh, K.S. Kim, Bond strength of reinforcing bars considering failure mechanism, Engineering Failure Analysis 94 (2018) 327-338.
- [17] X. Song, Y. Wu, X. Gu, C. Chen, Bond behaviour of reinforcing steel bars in early age concrete, Construction and Building Materials 94 (2015) 209-217.
- [18] B.P. Hughes, C. Videla, Design criteria for early-age bond strength in reinforced concrete, materials and structures, 52 (1992) 445-463.
- [19] A.M. Diab, H.E. Elyamany, M.A. Hussein, H.M. Al Ashy,

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

S.A. Hosseini, S. Etedali, Laboratory Evaluation of Bond Strength Between Rebar and Concrete Containing Limestone Powder, Amirkabir J. Civil Eng., 52(9) (2020) 2279-2288.

DOI: [10.22060/ceej.2019.16315.6186](https://doi.org/10.22060/ceej.2019.16315.6186)



