



بررسی مقاومت پیوستگی میلگرد در بتن سبک سازه‌ای حاوی میکروسیلیس

رضا مرشد^۱، حسن صابری^۲، غلامرضا هوایی^۳، یزدان حیاتی^۴

۱- عضو هیأت علمی، دانشگاه یزد، morshed@yazduni.ac.ir

۲- کارشناس ارشد سازه، دانشگاه یزد

۳- عضو هیأت علمی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

۴- دانشجوی دکتری سازه، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

چکیده

کاهش وزن سازه‌های بتنی برای کاهش نیروی زلزله وارد بر این سازه‌ها در هنگام وقوع زلزله، سبب شده است تا تحقیقات زیادی در زمینه تکنولوژی بتن سبک سازه‌ای انجام گیرد. یکی از مسائل مهم در مورد کاربرد بتن‌های سبک سازه‌ای، میزان مقاومت پیوستگی بین میلگرد و بتن سبک سازه‌ای است. با کاربرد سبک‌دانه‌ها در بتن سبک سازه‌ای می‌توان پیش‌بینی کرد که فاز سنگدانه تضعیف شده و بنابراین مقاومت بتن و مقاومت پیوستگی بین میلگرد با بتن کاهش یابد. در مقاله حاضر نتایج آزمایشات صورت گرفته در زمینه میزان تأثیر میکروسیلیس روی مقاومت پیوستگی میلگرد با بتن سبک سازه‌ای ارائه می‌گردد. در این بررسی در ۴ سری نمونه ساخته شده ۰، ۵، ۱۰، ۱۵ درصد میکروسیلیس جایگزین سیمان شد و مقاومت پیوستگی میلگرد با بتن سبک‌دانه سازه‌ای اندازه‌گیری گردید. بر اساس نتایج بدست آمده، افزودن میکروسیلیس می‌تواند بطور قابل ملاحظه‌ای مقاومت پیوستگی و مهار میلگرد در بتن سبک‌دانه را بهبود بخشد.

کلمات کلیدی: بتن سبک‌دانه، میکروسیلیس، مقاومت پیوستگی

۱- مقدمه

اهمیت کاهش وزن سازه‌ها به منظور فراهم‌آوردن شرایطی مناسب جهت ساخت سازه‌های ایمن‌تر در مقابل زلزله بر کسی پوشیده نیست. مقاومت پیوستگی کم میلگرد در بتن‌های سبک‌دانه سازه‌ای یکی از مهم‌ترین نواقص این نوع بتن‌هاست. مقاومت پیوستگی بین فولاد و بتن بدین معناست که بتن اطراف یک میلگرد، حداکثر تا چه مقدار، قادر به تحمل تنش پیوستگی و انتقال نیرو از میلگرد به بتن می‌باشد. محققین، انواع گوناگونی از اشکال آزمایش را برای مطالعه مقاومت پیوستگی بین میلگرد و بتن را مورد استفاده قرار داده‌اند که ۳ نوع آزمایش، آزمایش بیرون کشیدن، آزمایش تیر و آزمایش انتهای تیر رایج‌ترین نوع آزمایشات در بین آزمایشات دیگر می‌باشد [۱]. مطالعات زیادی در زمینه مقاومت پیوستگی بالاخص روی ترم‌های مقاومت پیوستگی بین آرماتور و بتن ساخته شده با دانه‌های سبک مصنوعی در بتن سبک-دانه، توسط محققین مختلف صورت گرفته است. گجورو و مونتریو و مهتا در سال ۱۹۹۰ با انجام آزمایش بیرون کشیدن میلگرد از داخل بتن سبک‌دانه مطابق استاندارد ASTM C 234، نشان دادند که با افزایش مقدار میکروسیلیس، مقاومت پیوستگی بین آرماتور و بتن افزایش می‌-

یابد [۲]. بر اساس مطالعات آقای مر، استفاده از میکروسیلیس در بتن سبک-دانه‌سازه‌ای، نسبت مقاومت فشاری به مدول الاستیسیته را تغییر نداده اما این ماده توانسته است مقاومت پیوستگی به مقاومت فشاری بتن سبک را در کرنش ۰/۲۵ میلیمتر، ۲ برابر کند. این در حالی است که این ماده روی بتن ساخته شده با دانه‌های معمولی تأثیر مهمی نداشته است. بر اساس نتایج این محقق، در بتن‌های حاوی میکروسیلیس، تخلخل و ضخامت ناحیه انتقال در مجاورت میلگرد، کاهش می‌یابد [۳]. حسین در سال ۲۰۰۸ نشان داد که رابطه بار-تغییر مکان به مقاومت فشاری بتن، طول قرار گرفته در بتن و نوع بتن معمولی یا بتن حاوی سبک‌دانه بستگی دارد و مقاومت پیوستگی با افزایش طول قرار گرفته در هر دو بتن سبک-دانه و بتن معمولی کاهش می‌یابد [۴]. سنکاک و همکاران در سال ۲۰۱۱ با یک سری آزمایشات بیرون کشیدن میلگرد از بتن، مشاهده کردند که در مخلوط‌های بتن سبک سازه‌ای ساخته شده با دانه‌های پومیس، کاهش مقاومتی بین ۴۸ تا ۶۵ درصد نسبت به مخلوط‌های بتن سازه‌ای ساخته شده با سنگدانه‌های معمولی وجود دارد. آنها همچنین مشاهده کردند که کاربرد همزمان فوق روان کننده و میکروسیلیس، سبب افزایش مقاومت پیوستگی در هر دو نوع مخلوط‌های ذکر شده می‌شود [۵].

در مقاله حاضر، نتایج تحقیقاتی که در زمینه تنش پیوستگی در بتن‌های سبک‌دانه حاوی ۰، ۵، ۱۰، ۱۵ درصد میکروسیلیس انجام شده است، ارائه می‌گردد. روش‌انجام‌آزمایش تعیین مقاومت پیوستگی مطابق استاندارد ASTM C 234 می‌باشد، بر اساس نتایج بدست آمده، افزودن میکروسیلیس بطور قابل ملاحظه‌ای مقاومت پیوستگی و رفتار نرم پیوستگی در بتن سبک‌دانه را بهبود می‌بخشد.

۲- مشخصات مصالح مصرفی

۱-۲- مشخصات ریزدانه

برای افزایش وزن مخصوص و مقاومت نمونه‌ها، از ماسه معمولی مطابق استاندارد ASTM C 33 با مدول نرمی ۲/۸ استفاده گردید. دانه‌بندی ماسه استفاده شده در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱. دانه بندی ماسه مصرفی

الک	۸	۱۶	۳۰	۵۰	۱۰۰
درصد رد شده	۱۰۰	۶۸/۴	۳۸/۲	۱۱/۶	۱

۲-۲- دانه‌بندی سنگدانه‌های سبک

برای ساخت مخلوط‌های بتن سبک سازه‌ای، لیکای سازه‌ای با وزن مخصوص تقریباً 700 Kg/m^3 مورد استفاده قرار گرفت. جدول ۲ مشخصات این نوع دانه‌بندی را نشان می‌دهد. لازم بذکر است که این دانه‌بندی بر اساس نتایج آزمایشاتی که در انستیتو مصالح ساختمانی دانشگاه تهران صورت گرفته و توسط این انستیتو برای تهیه بتن سازه‌ای ساخته شده با لیکا پیشنهاد شده است، می‌باشد.

۳-۲- مشخصات سایر اجزاء

سیمان مورد مصرف در این تحقیق، سیمان پرتلند تیپ ۲ کارخانه سیمان اردستان می باشد. زمان گیرش اولیه و نهایی این نوع سیمان به ترتیب ۹۵ و ۱۵۰ دقیقه و عدد بلین آن $3000 \pm 50 \text{ cm}^2/\text{g}$ می باشد.

جهت بررسی تأثیر میکروسیلیس روی مقاومت پیوستگی بتن، از این نوع ماده به میزان ۰، ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد وزن سیمان در مخلوطها به صورت جایگزین سیمان مورد استفاده قرار گرفت. لازم بذکر است که وزن مخصوص میکروسیلیس مصرفی $2200 \text{ Kg}/\text{M}^3$ می باشد. در جداول ۳ و ۴ ترکیبات شیمیایی سیمان و میکروسیلیس مصرفی نشان داده شده است.

جدول ۲. دانه بندی سبک دانه لیکا مورد استفاده در مخلوطهای بتنی

۱۵۰	۳۰۰	۶۰۰	۱/۱۸	۲/۳۶	۴/۷۵	۹/۵	۱۲/۵	۱۹	الک
μm	μm	μm	mm	mm	mm	Mm	mm	mm	
									درصد وزنی
									عبوری از الک
۱	۲/۴	۴/۳	۶/۸	۱۱/۹	۲۶/۱	۷۱/۵	۱۰۰	۱۰۰	با چشمه های
									مربع

جدول ۳. ترکیب شیمیایی میکروسیلیس مصرفی (درصد وزنی عناصر)

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	C	Na ₂ O	K ₂ O	Mg O	S	CaO	MnO	P ₂ O ₅	LOI	PH
90- 95	0.6- 1.2	0.3- 1.3	0.2- 0.4	0.3- 0.5	0.2- .05	0.5- 2	0.4- 0.08	0.5- 1.5	0.02- 0.07	0.0 4	0.4- 3	6.6- 8.8

برای فراهم آوردن کارآیی مطلوب در مخلوطهای بتنی، از نوعی فوق روان کننده بر پایه پلی کربوکسیلات ساخت شرکت وند شیمی با نام تجاری P.C.E منطبق با استاندارد ASTM C 494 استفاده شد. فوق روان کننده مذکور به صورت محلول تیره رنگ به میزان ۱ درصد وزنی مواد سیمانی، در همه مخلوطهای بتنی استفاده شد.

جدول ۴. ترکیب شیمیایی سیمان تیپ ۲ اردستان

Chemical Analysis			Standard Value			Physical Properties											
% SiO ₂	22.00±0.4	20 % Min.	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Setting Time (Minutes)</th> <th colspan="2">Standard Values</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Initial Sett.</td> <td>95±5</td> <td>45 Min.</td> </tr> <tr> <td>Final Sett.</td> <td>150±10</td> <td>360 Max.</td> </tr> </tbody> </table>			Setting Time (Minutes)	Standard Values		Initial Sett.	95±5	45 Min.	Final Sett.	150±10	360 Max.			
Setting Time (Minutes)	Standard Values																
Initial Sett.	95±5	45 Min.															
Final Sett.	150±10	360 Max.															
% Al ₂ O ₃	5±0.3	6 % Max.															
% Fe ₂ O ₃	3.82±0.2	6 % Max.															
% CaO	64.00±0.5																
% MgO	1.9±0.2	5 % Max.															
% SO ₃	1.5±0.2	3 % Max.															
% K ₂ O	0.49±0.2																
% Na ₂ O	0.25±0.15																
% Cl	0.019±0.001																
Insoluble Residue	0.46±0.2	0.75 % Max.	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Fineness (Cm²/gr)</th> <th colspan="2">Standard Values</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Blaine</td> <td>3000±50</td> <td>2800 Min.</td> </tr> </tbody> </table>			Fineness (Cm ² /gr)	Standard Values		Blaine	3000±50	2800 Min.						
Fineness (Cm ² /gr)	Standard Values																
Blaine	3000±50	2800 Min.															
% L.O.I.	1.0±0.2	3 % Max.	<table border="1"> <thead> <tr> <th>AUTOCLAVE%</th> <th colspan="2">Standard Values</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td></td> <td>0.14±0.1</td> <td>0.8 Max.</td> </tr> </tbody> </table>			AUTOCLAVE%	Standard Values			0.14±0.1	0.8 Max.						
AUTOCLAVE%	Standard Values																
	0.14±0.1	0.8 Max.															
LSF	91.00±1.0		<table border="1"> <thead> <tr> <th>Compressive Strength (kg/Cm²)</th> <th colspan="2">Standard Values</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td><u>3</u> Days</td> <td>≥ 170</td> <td>100 Min.</td> </tr> <tr> <td><u>7</u> Days</td> <td>≥ 275</td> <td>175 Min.</td> </tr> <tr> <td><u>28</u> Days</td> <td>≥ 370</td> <td>315 Min.</td> </tr> </tbody> </table>			Compressive Strength (kg/Cm ²)	Standard Values		<u>3</u> Days	≥ 170	100 Min.	<u>7</u> Days	≥ 275	175 Min.	<u>28</u> Days	≥ 370	315 Min.
Compressive Strength (kg/Cm ²)	Standard Values																
<u>3</u> Days	≥ 170	100 Min.															
<u>7</u> Days	≥ 275	175 Min.															
<u>28</u> Days	≥ 370	315 Min.															
% C _A	6.5±1	5 - 8 %															
CaFree	1.2±0.2																

Reference: ISIRI 389

۳- برنامه ریزی آزمایشات

برای انجام آزمایشات در بتن های فوق از ۴ درصد مختلف وزنی میکروسیلیس به وزن سیمان (۰، ۵، ۱۰، ۱۵ درصد) استفاده گردید. در مجموع ۴ سری نمونه هریک شامل ۳ مکعب فشاری، ۳ مکعب مربوط به آزمایش بیرون کشیدن میلگرد مطابق طرح اختلاط جدول ۵ ساخته شد. اختلاط نمونه ها در یک مخلوط کن ایستا مطابق استاندارد ASTM C 192 انجام گرفت. مقدار اسلامپ بتن جهت طراحی تمامی مخلوطها برابر mm ۱۰۰ در نظر گرفته شد. متراکم ساختن نمونه مکعب های ۱۵۰ میلیمتر به صورت ضربه زدن با میله (در دو لایه و هر لایه ۲۵ ضربه)، انجام گرفت. عمل آوری مرطوب نمونه ها در یک حوضچه آب با دمای 23 ± 2 درجه سانتیگراد تا سن ۲۸ روز ادامه یافت. پس از خروج نمونه ها از آب، نمونه ها به مدت یک هفته در دمای آزمایشگاه نگهداری شدند و سپس آزمایشات به عمل آمد. وزن مخصوص تمامی نمونه ها 1850 ± 50 کیلوگرم بر مترمکعب محاسبه شد.



شکل ۱. نمونه‌های آماده شده برای آزمایش Pull out

جدول ۵. مقادیر اجزاء مخلوطهای بتنی

شماره طرح	سیمان (kg/m ³)	میکروسیلیس (kg/m ³)	لیکا (kg/m ³)	ماسه (kg/m ³)	آب (kg/m ³)	نسبت آب به مواد سیمانی
۱	۴۷۰	۰	۳۰۰	۹۵۰	۱۴۰/۱۴۵	۰,۲۹۸
۲	۴۴۶,۵	۲۳/۵	۳۰۰	۹۵۰	۱۴۱,۸۵	۰,۳۰۲
۳	۴۲۳	۴۷	۳۰۰	۹۵۰	۱۴۵,۲۷	۰,۳۰۹
۴	۳۹۹,۵	۷۰/۵	۳۰۰	۹۵۰	۱۴۸,۶۹	۰,۳۱۶

۴- نحوه انجام آزمایش

مطابق استاندارد ASTM C 234، برای ساخت نمونه‌های اندازه‌گیری مقاومت پیوستگی، در هر کدام از طرح‌ها، ۳ نمونه مکعب ۱۵۰×۱۵۰×۱۵۰ میلیمتر که میلگرد آجدار ۱۸ میلیمتر بصورت قائم در وسط نمونه‌ها قرار گرفته بود، ساخته شد. برای انجام آزمایش بیرون کشیدن میلگرد از یک دستگاه جک دستی استفاده گردید. همانگونه که در شکل ۲ مشاهده می‌شود این دستگاه روی نمونه قرار گرفته و تغییر مکان در دو طرف میلگرد بوسیله ۲ کرنش سنج با دقت ۰/۰۱ میلیمتر ثبت می‌گردد. تغییر مکان میلگرد میانگین این دو تغییر مکان در نظر گرفته شد. تغییر مکان الاستیک میلگرد در فاصله سطح بتن تا محل اندازه‌گیری تغییر مکان محاسبه و از تغییر شکل اندازه‌گیری شده کسر گردید.

۵- نتایج آزمایشات

نتایج آزمایشات مربوط به میانگین ۳ نمونه از مخلوطهای ساخته شده با دو نوع لیکا با اندازه‌های حداکثر اسمی ۱۹ و ۱۲ میلیمتر، به ازای درصدهای مختلف میکروسیلیس (۰، ۵، ۱۰، ۱۵) مورد بررسی قرار می‌گیرد. نمودار ۱ رابطه نیرو- تغییر مکان یکی از نمونه‌ها را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که در تمامی نمونه‌های آزمایش شده خروج میلگرد منوط به تشکیل ۳ یا ۴ ترک در پیرامون نمونه شد. مطابق این نمودار، در نیروهای اولیه اعمالی، تغییر مکان زیادی دیده می‌شود که این موضوع را می‌توان به لغزش میلگرد در فک بالایی دستگاه نسبت داد لذا برای داشتن منحنی نیرو- تغییر مکان واقعی، این قسمت اولیه باید حذف شود. بدین منظور، یک خط مماسی از محلی که تغییر مکان بزرگ از بین می‌رود رسم شده و منحنی به سمت چپ جابه‌جا می‌شود. تمام منحنی‌های نیرو-تغییر مکان نمونه‌ها تقریباً مشابه نمودار ۱ بوده که برای اختصار، نمودارهای آنها در

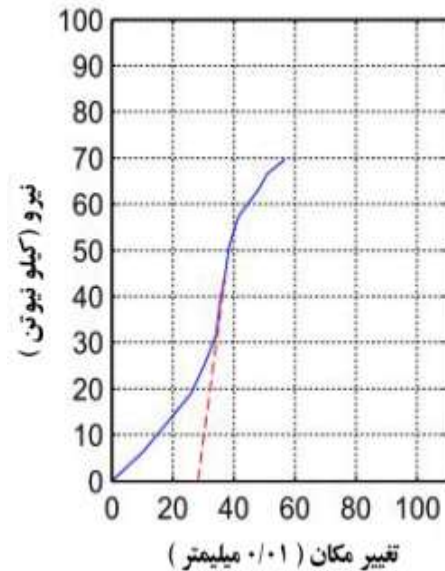
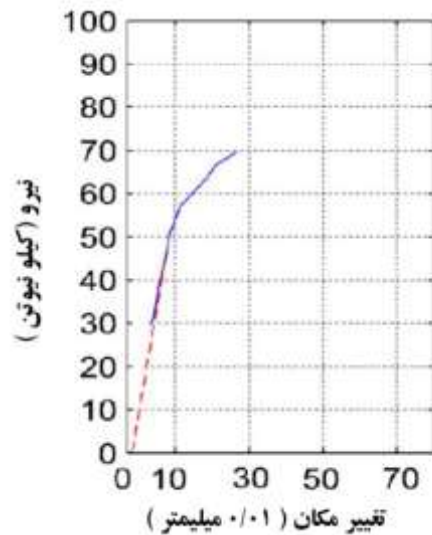
این مقاله ارائه نشده است. در جدول ۶ میانگین مقاومت‌های پیوستگی ۳ نمونه از ۴ سری طرح آزمایش شده، نشان داده شده است. همانگونه که مشاهده می‌گردد جایگزین شدن ۵ تا ۱۵ میکروسیلیس بجای سیمان، سبب افزایش قابل توجه در مقاومت پیوستگی میلگرد با بتن سبک شده است.

جدول ۶. مقادیر مقاومت پیوستگی بتن حاوی لیکا با اندازه حداکثر اسمی ۱۲ میلیمتر

سری طرح	۱	۲	۳	۴
مقاومت پیوستگی (KN)	۷۸	۱۰۴	۹۵	۸۵



شکل ۲. نحوه انجام آزمایش Pull out



نمودار ۱. رابطه نیرو-تغییر مکان یک از نمونه‌های Pullout نمودار ۲. رابطه نیرو-تغییر مکان اصلاح شده یک از نمونه‌های Pull out

۳- نتیجه گیری

در تحقیق حاضر، اثر میکرو سیلیس روی مقاومت پیوستگی بتن سبک سازه‌ای حاوی لیکا با اندازه حداکثر اسمی ۱۹ میلیمتر به عنوان سبک‌دانه و نیز ماسه طبیعی به عنوان مصالح ریزدانه، مورد بررسی قرار گرفت. برای بتن‌های فوق، از چهار درصد مختلف وزنی میکروسیلیس به وزن سیمان (۰، ۵، ۱۰، ۱۵ درصد) استفاده گردید. تعیین مقاومت پیوستگی بتن‌های سبک مذکور، به روش آزمایش بیرون کشیدن میلگرد مطابق استاندارد ASTM C 234 صورت گرفت.

۱. بر اساس نتایج بدست آمده، افزودن میکروسیلیس به صورت جایگزین سیمان می‌تواند به افزایش مقاومت پیوستگی میلگرد با بتن سبک سازه‌ای منجر گردد.

۲. میزان تغییر مکان در حالت نهایی شکست در نمونه‌های بیرون کشیدن میلگرد، با افزایش میزان جایگزینی میکروسیلیس، افزایش می‌یابد.

۳. در همه نمونه‌های مورد آزمایش، مد شکست پیوند در اثر ترک خوردگی بتن و با ایجاد ۳ یا چهار ترک در وجوه نمونه اتفاق افتاد.

۴. در مجموع استفاده از بتن سبک با اندازه حداکثر اسمی ۱۲ میلیمتر و ۵ تا ۱۰ درصد وزنی میکروسیلیس بهترین نتیجه را از نظر پیوستگی مهاری میلگرد تأمین می‌نماید.

مراجع

- [1] ACI Committee 408. "Bond and development of straight reinforcing bars in tension", ACI 408R-03, American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich, (2003).
- [2] Gjord O. E, Monteiro P. J. M, Mehta P. K. "Effect of Condensed Silica Fume on the Steel-Concrete Bond", ACI Materials Journal, 87, (1990) 573-580.
- [3] Mor A. "Steel-Concrete Bond in High-Strength Lightweight Concrete", ACI Materials Journal, 89, (1992) 76-82.
- [4] Hossain K. M. A. "Bond characteristics of plain and deformed bars in lightweight pumice concrete", Construction and Building Materials, 22, (2008) 1491-1499.
- [5] Sancak E, Simsek O, Apay A. C. "A comparative study on the bond performance between rebar and structural lightweight pumice concrete with/without admixture", Physical Sciences, 6, (2011) 3437-345.
- [6] ASTM C 234-9. "Standard test method for comparing concretes on the basis of the bond developed with reinforcing steel", Annual Book of ASTM Standards, West Conshohocken, PA, USA, (2000).
- [7] ASTM C 330. "Standard specification for lightweight aggregates for structural concrete", Annual Book of ASTM Standards, West Conshohocken, PA, USA, (2003).
- [8] ASTM C 494. "Standard specification for chemical admixtures for concrete". Annual Book of ASTM Standards, ASTM, West Conshohocken, PA, USA, (1994).