

## بررسی روابط طراحی تیر بتن مسلح سبک سازه‌ای حاوی سبکدانه‌های رس منبسط‌شده و پلی‌استایرن منبسط‌شده

علی صدر ممتازی\*

دانشیار دانشکده فنی، دانشگاه گیلان

حسن نصرتی

کارشناس ارشد عمران-سازه، دانشگاه گیلان

### چکیده

با توجه به مزایای فراوان بتن خودتراکم مانند عدم نیاز به ویریه، کیفیت بالا، کاهش آلودگی صوتی هنگام اجرا و ... تمایل به استفاده از این نوع بتن به طور روزافزون در حال افزایش است. از سوی دیگر، یافتن راهی برای استفاده از سبکدانه‌های مصنوعی به منظور کاهش وزن مرده سازه، کاهش اثرات مخرب زیست‌محیطی و حفظ منابع مصالح سنگی موجود، ما را به سمت استفاده از مصالح جدید سوق می‌دهد. در این مقاله تاثیر به کارگیری دو نوع مصالح سبک مصنوعی شامل رس منبسط شده (LECA<sup>۱</sup>) و پلی‌استایرن منبسط شده (EPS<sup>۲</sup>) در بتن خودتراکم ارزیابی شده و الزامات بتن خودتراکم در حالت تازه و امکان قرارگیری در رده بتن خودتراکم سبک سازه‌ای در حالت سخت شده، مورد بررسی قرار گرفته است. به منظور ارزیابی امکان استفاده از بتن خودتراکم سبک سازه‌ای در اعضای باربر خمشی، تیرهای بتن مسلح با توجه به ضوابط آیین‌نامه ACI 318M-11 طراحی شده و در آزمایشگاه تحت بارگذاری قرار داده شدند. نتایج بارگذاری تیرها در هر سه سطح ترک‌خوردگی، بهره‌برداری و نهایی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که استفاده از روابط آیین‌نامه ACI 318M-11 در مورد به کارگیری بتن خودتراکم سبک سازه‌ای حاوی سبکدانه رس منبسط شده کاملاً در جهت اطمینان است. در این حالت ضریب تاثیر بتن سبک که توسط آیین‌نامه ACI 318M-11 به دست می‌آید کوچکتر از مقدار به دست آمده در آزمایشگاه می‌باشد. روابط آیین‌نامه لنگرهای کوچکتر از لنگر حقیقی تیر و خیزهایی بزرگتر از خیز حقیقی آن را نشان می‌دهند. این در حالی است که استفاده از سبکدانه EPS در ساخت تیر بتن مسلح سبک سازه‌ای از هماهنگی کامل با روابط آیین‌نامه برخوردار نمی‌باشد. در این حالت ضریب تاثیر بتن سبک که توسط آیین‌نامه ACI 318M-11 به دست می‌آید بزرگتر از مقدار به دست آمده در آزمایشگاه است و در حد ترک خوردگی مدول گسیختگی و لنگر ترک خوردگی محاسباتی بزرگتر از مقدار واقعی آنهاست که این امر در خلاف جهت اطمینان است.

**واژه‌های کلیدی:** تیر بتن مسلح، روابط طراحی، بتن خودتراکم سبک سازه‌ای، رس منبسط شده، EPS

\* نویسنده مسؤول: Sadrmomtazi@yahoo.com

<sup>۱</sup> LECA Light Expanded Clay Aggregate

<sup>۲</sup> EPS Expanded Poly Styrene

## ۱- مقدمه

بتن خودتراکم بتنی با کار آبی بالا است. این بتن به آسانی می‌تواند از بین ازدحام میلگردها عبور نماید و حجم قالب را پر نماید و همچنین تحت اثر وزن خود بدون جداشدگی و آب‌انداختگی تراکم یابد. روانی بالای بتن خودتراکم امکان پر نمودن قالب بدون نیاز به لرزاندن آن را فراهم نموده است [۲-۱]. بتن خودتراکم می‌تواند مشکلات عدیده بتن معمولی را به آسانی مرتفع سازد، لذا از اهمیت بسزایی در صنعت بتن و ساختمان برخوردار می‌باشد. امروزه موضوع بسیاری از تحقیقات مهم مخصوصاً در ژاپن و اروپا بتن خودتراکم می‌باشد [۳]. در سالیان اخیر با توسعه و رشد روزافزون استفاده از بتن خودتراکم امکان به کارگیری انواع سبکدانه‌های طبیعی و مصنوعی توسط محققان مختلف مورد ارزیابی قرار گرفته است [۴-۷]. در آیین‌نامه ACI 318M-11 در تعریف بتن سبک ذکر شده است که بتن سبک‌سازه‌ای، بتنی است که چگالی آن کمتر از ۱۸۴۰ کیلوگرم بر متر مکعب بوده و مقاومت فشاری ۲۸ روزه آن بیشتر از ۱۷ مگاپاسکال باشد. حداقل مقاومت فشاری لازم برای المان‌های سازه‌ای براساس آیین‌نامه ACI 318M-11، ۲۰ مگاپاسکال می‌باشد [۸]. شیدلر در سال ۱۹۵۷ نیل به مقاومت‌های اقتصادی بتن سبکدانه سازه‌ای را در محدوده ۲۰ تا ۳۵ مگاپاسکال مطرح نمود [۹].

هر سبکدانه‌ای با توجه به چگالی و میزان تخلخلش می‌تواند مزایا و معایبی را به همراه داشته باشد. یکی از مصالح فوق سبک، سبکدانه آبگریز پلی‌استایرن منبسط شده می‌باشد. این نوع سبکدانه به دلیل عدم تأثیرگذاری روی آب کلی اختلاط مورد توجه است. البته به کارگیری آن در بتن خودتراکم می‌تواند تأثیرات نامطلوبی بر روی خواص بتن تازه و سخت شده به همراه داشته باشد. بر اساس مطالعات بابویا افزایش میزان پلی‌استایرن منبسط شده در بتن مقاومت آن کاهش پیدا می‌کند. همچنین براساس مطالعاتی که او بر روی بتن حاوی EPS در حضور دوده سیلیس انجام داد درصد جایگزینی بهینه دوده سیلیس را ۹ درصد گزارش کرد، که بتن تولید شده دارای مقاومت فشاری ۲۰ مگاپاسکال بود [۱۰ و ۱۱]. صدرممتازی و همکارانش درصدهای مختلف جایگزینی پلی‌استایرن منبسط شده را بر روی بتن معمولی حاوی دوده سیلیس و خاکستر

پوسته شلتوک برنج بررسی کردند، مطابق نتایج ایشان با جایگزینی ۱۵ درصد حجم بتن توسط سبکدانه EPS بتنی با چگالی ۱۹۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب و مقاومت ۲۸ روزه ۳۲ مگاپاسکال به دست آمد. با جایگزینی ۲۵ درصد حجم بتن توسط EPS چگالی بتن به ۱۷۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب و مقاومت فشاری آن به حدود ۱۷ مگاپاسکال کاهش یافت [۱۲]. بنابراین مقاومت بتن سبک حاوی پلی‌استایرن منبسط شده به شدت تابع چگالی آن می‌باشد. یکی دیگر از سبکدانه‌های مورد بررسی در این مطالعه، سبکدانه رس منبسط شده (لیکا) می‌باشد. جذب آب لیکا به دلیل متخلخل بودن ساختار آن زیاد است. خصوصیات بتن خودتراکم سبک حاوی لیکا در فاز تازه و سخت شده در تحقیقات مظاهری‌پور و همکارانش مورد بررسی قرار گرفته است [۴]. همچنین بر اساس مطالعات تامیو همکارانش مقاومت بتن سبک حاوی رس منبسط شده تابعی از اندازه دانه‌های آن است و بهترین نتایج وقتی به دست آمد که اندازه دانه‌ها به ۱۵ میلی‌متر محدود می‌شد [۱۳]. بتن سبک سازه‌ای مشابه بتن معمولی است با این تفاوت که جرم حجمی کمتری دارد. برای ساخت این بتن از سبکدانه (هم سبکدانه درشت و هم سبکدانه ریز) یا ترکیبی از سبکدانه‌ها و سنگدانه‌های معمولی استفاده می‌شود. اصطلاح "بتن سبک ماسه‌دار" به بتن سبکی اطلاق می‌شود که با سبکدانه درشت و ماسه طبیعی ساخته شده باشد [۸]. جرم حجمی خشک شده در هوا برای بتن سبک سازه‌ای باید بین ۱۴۰۰ تا ۱۸۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب و مقاومت فشاری آن بیش از ۱۷ مگاپاسکال باشد. بتن سبک سازه‌ای اساساً به منظور کاهش بار مرده ناشی از وزن اعضای بتنی مانند سقف‌ها در ساختمان‌های بلندمرتبه به کار گرفته می‌شود. به هر حال سبکدانه‌های تولید شده باید مورد آزمایش قرار بگیرند تا همخوانی با ملزومات آیین‌نامه را اثبات نمایند. در این مقاله به منظور ارزیابی امکان به کارگیری بتن خودتراکم سبک سازه‌ای در اعضای باربر خمشی، تیرهای بتن مسلح با توجه به ضوابط آیین‌نامه ACI 318M-11 طراحی شده و در آزمایشگاه تحت بارگذاری قرار داده شدند. در مورد بتن‌های سبک متعارف آیین‌نامه ضرایب و روابطی را ارائه داده است ولی در مورد بتن‌های سبک حاوی سبکدانه‌های EPS نیاز

به بررسی بیشتر می‌باشد، لذا نتایج بارگذاری تیرها در هر سه سطح ترک‌خوردگی، بهره‌برداری و نهایی مورد بررسی قرار گرفته و امکان استفاده از روابط آیین‌نامه در مورد طرح اختلاط‌های پیشنهادی بررسی شده است.

## ۲- مصالح مصرفی

شن و ماسه مصرفی رودخانه‌ای بوده و چگالی آنها در حالت اشباع با سطح خشک به ترتیب ۲/۶۴ و ۲/۶ گرم بر سانتی‌متر مکعب می‌باشد. جذب آب ۲۴ ساعته شن و ماسه به ترتیب ۱/۵ و ۲/۵ درصد تعیین شده است، همچنین برای افزایش کارایی بتن و افزایش بخش ریزدانه ماسه از پودر سنگ با چگالی ۲/۷ گرم بر سانتی‌متر مکعب استفاده شده است، چگالی لیکا با در نظر گرفتن جذب آب نیم‌ساعته آن (بر اساس استاندارد BS EN 1097-6) ۱/۱۲ گرم بر سانتی‌متر مکعب، جذب آب نیم‌ساعته آن ۸ درصد و جذب آب ۲۴ ساعته آن ۱۴ درصد است. دانه‌بندی شن و ماسه بر اساس استاندارد ASTM C33

## ۳- طرح اختلاط

طرح‌های اختلاط به سه گروه مختلف تقسیم شده‌اند. در گروه اول بتن خودتراکم بدون سبکدانه با استفاده از سیمان پرتلند نوع ۱ و دوده سیلیس ساخته شده است. در گروه دوم تمام شن ۱۲/۵-۶ و ماسه ۶-۳ با لیکا جایگزین شده است. در گروه سوم

جدول ۱- دانه‌بندی مصالح

اندازه الک (mm)	درصد عبوری					لیکا (۳-۶mm)
	شن (۶-۱۲/۵mm)	ماسه (۰-۶mm)	پودر سنگ	EPS	لیکا (۶-۱۲/۵mm)	
mm19	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰
mm12/5	۹۱/۱	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰
mm9/5	۶۷/۱۲	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۴۲	۱۰۰
mm4/75	۴/۳۶	۹۹/۷۹	۱۰۰	۹۷	۰	۱۰۰
mm2/36	۰/۴۳	۹۲/۹۶	۱۰۰	۳	۰	۲۵
mm1/18	۰	۷۷/۳۵	۹۵	۰	۰	۴
mm600	۰	۵۸	۸۰	۰	۰	۰
mm300	۰	۲۲/۳۲	۶۱	۰	۰	۰

جدول ۲- آنالیز شیمیایی سیمان و دوده سیلیس

مصالح سیمانی	ترکیبات شیمیایی %							
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>
سیمان	۲۱	۵/۲۶	۳	۶۳	۲/۷	۰/۲۷	۰/۵۸	۲/۳
دوده سیلیس	۹۳/۶۲	۱/۳۲	۰/۸۷	۰/۴۹	۰/۹۷	۰/۳۱	۱/۰۱	۰/۱

جدول ۳- طرح اختلاط

نام طرح	مواد سیمانی		سنگدانه‌ها					آب		W/b	SP Kg/m <sup>3</sup>	چگالی Kg/m <sup>3</sup>
	C Kg/m <sup>3</sup>	SF Kg/m <sup>3</sup>	LS Kg/m <sup>3</sup>	S(0-3) Kg/m <sup>3</sup>	S(3-6) Kg/m <sup>3</sup>	G(6-12.5) Kg/m <sup>3</sup>	Leca Kg/m <sup>3</sup>	EPS Kg/m <sup>3</sup>				
SF10	۴۰۵	۴۵	۲۵۰	۵۳۵	۱۳۵	۸۵۰	۰	۰	۱۶۲	۰/۳۶	۵/۴	۲۳۳۵
LSF10	۴۰۵	۴۵	۲۵۰	۵۳۵	۰	۰	۴۲۰	۰	۱۶۲	۰/۳۶	۵/۴	۱۷۵۰
ESF10	۴۰۵	۴۵	۲۵۰	۳۴۷	۸۷/۷	۵۵۲/۵	۰	۰/۵۱	۱۶۲	۰/۳۶	۵/۴	۱۸۰۷

برای ساخت نمونه‌های پلی استایرن منبسط شده از شیوه‌ی خیاط و همکاران استفاده شده است [۱۴]. ابتدا سنگدانه‌ها شامل شن و ماسه و پودر سنگ و سبکدانه EPS به مدت ۳۰ ثانیه مخلوط شد، پس از آن در حالیکه مخلوط کن روشن بود نصف آب مصرفی به مخلوط اضافه شده و به مدت یک دقیقه عملیات اختلاط ادامه یافت. در این مرحله مخلوط کن خاموش شده و سیمان و پوزولان اضافه گردید و به مدت ۱ دقیقه دیگر مخلوط کن روشن شد. آب باقیمانده به همراه فوق روان کننده به مخلوط اضافه شد و عملیات اختلاط برای ۵ دقیقه ادامه یافت.

#### ۴- بررسی نتایج آزمایشگاهی

##### ۴-۱- نتایج بتن تازه

در جدول ۴ مشخصات بتن تازه براساس راهنمای بتن خودتراکم اروپا نشان داده شده است [۱۵]. چنانچه مشاهده می‌شود حضور سبکدانه‌ها باعث کاهش خصوصیات بتن تازه شده است. با به کار بردن سبکدانه‌ها نتایج اسلامپ و قیف V تغییر محسوسی نکرده اند ولی قابلیت عبور از میان میلگردها با به کار بردن پلی استایرن منبسط شده به طور محسوسی کاهش پیدا کرده است. هر چند بر اساس راهنمای بتن خودتراکم اروپا رده بتن کماکان PA2 بوده و مطلوب می‌باشد. قابل ذکر است که رده PA2 در آزمایش جعبه L شامل ۳ میلگرد می‌باشد و برای تراکم آرماتورهای زیاد مورد استفاده قرار می‌گیرد. با توجه به مشخصات ذکر شده در جدول ۴ کلیه طرح اختلاطها الزامات بتن خودتراکم را برآورده کرده و می‌تواند در اعضای سازه‌ای از قبیل تیر و سقف به کار گرفته شوند. لذا به کارگیری آنها در تیرهای بتن مسلح که در آنها تراکم آرماتور وجود دارد بلامانع می‌باشد.

۳۵ درصد حجم شن و ماسه که معادل ۲۰ درصد حجم کل بتن است با سبکدانه EPS جایگزین شده است. جزئیات طرح‌های اختلاط در جدول ۳ مشاهده می‌شود.

##### ۳-۱- طرح اختلاط بتن خودتراکم

ابتدا شن و ماسه به داخل مخلوط کن ریخته شده و به مدت دو دقیقه مخلوط کن روشن شده و مصالح مخلوط گردید. پس از آن سیمان و پودر سنگ و مواد پوزولانی به درون مخلوط کن ریخته شد و عملیات اختلاط دو دقیقه دیگر ادامه یافت. در این مرحله بخشی از آب اختلاط به مخلوط اضافه شد پس از آن باقی آب اختلاط به همراه فوق روان کننده به تدریج به مخلوط اضافه شده و اختلاط برای مدت ۳ الی ۴ دقیقه دیگر ادامه پیدا کرد.

##### ۳-۲- طرح اختلاط بتن سبک خودتراکم حاوی

###### سبکدانه لیکا

در طرح‌های اختلاط شامل لیکا ابتدا به منظور کاهش تاثیر منفی جذب آب موثر در مخلوط بتن توسط سبکدانه‌ها، قبل از مخلوط کردن مصالح، پیش‌خیس کردن سبکدانه‌ها انجام شد. به این منظور حدود پانزده دقیقه عملیات پیش‌خیس کردن در مخلوط کن ادامه یافت. سپس ماسه و پودر سنگ اضافه شده و اختلاط به مدت ۱ دقیقه انجام شد. در نهایت سیمان و مواد پوزولانی به همراه باقی مانده آب و فوق روان کننده اضافه گردید به نحوی که در پایان مقدار آب جذب شده توسط لیکا معادل جذب آب نیم‌ساعته و از پیش تعیین شده گردید.

##### ۳-۳- طرح اختلاط بتن خودتراکم حاوی سبکدانه

###### EPS

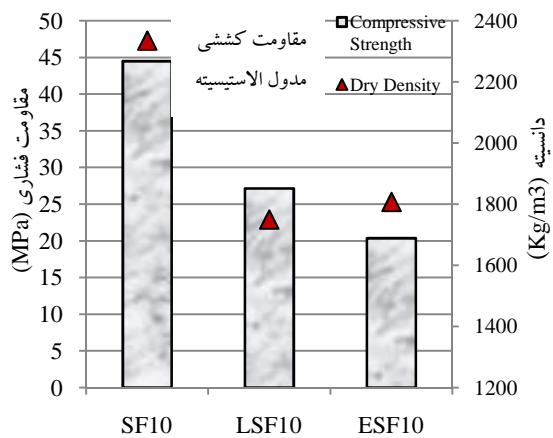
جدول ۴- خصوصیات بتن تازه

Mix ID	جریان اسلامپ		قیف V		جعبه L	
	ردده	mm	Sec	ردده	H2/H1	ردده
SF10	SF2	۷۰۰	۸	VF1	۰/۹۸	PA2
LSF10	SF2	۷۰۰	۸	VF1	۰/۹۶	PA2
ESF10	SF2	۷۲۰	۹	VF2	۰/۸۶	PA2

آنها در اعضای سازه‌ای بلامانع می‌باشد. شکل ۳ بیانگر کاهش مدول الاستیسیته و مقاومت کششی بتن حاوی سبکدانه است. کمترین مقاومت کششی و مدول الاستیسیته مربوط به طرح ESF10 می‌باشد.



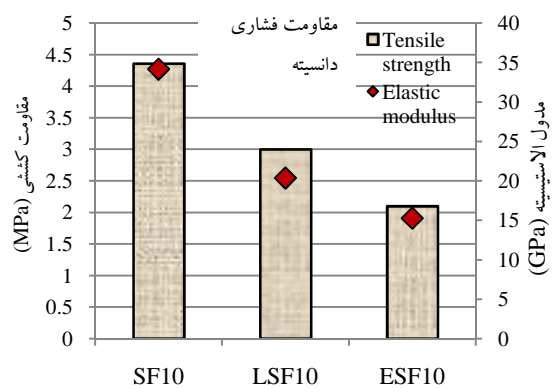
شکل ۱- گسیختگی آزمون استوانه‌ای در فشار



شکل ۳- مقاومت کششی و مدول الاستیسیته ۲۸ روزه

#### ۴-۲- نتایج بتن سخت شده

مقاومت فشاری براساس استاندارد ASTM C496 بر روی آزمون‌های استوانه‌ای ۱۵ x ۳۰ cm انجام شده است. تعداد آزمون‌ها در هر مورد ۳ عدد بوده و نتایج به صورت میانگین ارائه شده است. مقاومت کششی براساس ASTM C496 بر روی آزمون‌های استوانه‌ای ۱۵ x ۳۰ cm انجام شده است، تعداد آزمون‌ها در این آزمایش برای بتن‌های سبک ۸ عدد و برای بتن با وزن معمولی ۳ عدد می‌باشد. همچنین مدول الاستیسیته براساس استاندارد ASTM C469 بر روی آزمون‌های استوانه‌ای ۱۵ x ۳۰ cm و آزمایش تعیین چگالی براساس استاندارد ASTM C567 انجام گرفته است. سن بتن در زمان انجام آزمایش‌ها ۲۸ روز بوده و کلیه آزمون‌ها تا زمان آزمایش به صورت مرطوب نگهداری شده‌اند. نحوه گسیختگی آزمون فشاری استوانه‌ای در شکل ۱ نشان داده شده است. همانطور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود چگالی دو طرح حاوی سبکدانه کمتر از ۱۸۶۰ kg/m<sup>3</sup> می‌باشد و براساس استاندارد ACI 318 این بتن‌ها در رده بتن سبک قرار می‌گیرند. همچنین مقاومت فشاری کلیه طرح‌ها بیشتر از ۱۷ مگاپاسکال بوده و استفاده از



شکل ۲- مقاومت فشاری و چگالی ۲۸ روزه

## ۵- آماده‌سازی و بارگذاری تیرهای بتنی

### ۵-۱- تهیه و عمل‌آوری تیرهای بتنی

به منظور بررسی پارامترهای طراحی تیر بتنی خودتراکم حاوی سبکدانه‌های لیکا و EPS و امکان‌سنجی استفاده از روابط آیین‌نامه 318 ACI در طراحی آن به عنوان عضو سازه‌ای سه تیر بتنی با ابعاد و سطح مقطع نشان داده شده در شکل ۴ ساخته شدند. یکی از تیرها با استفاده از طرح اختلاط (SF10) که مربوط به بتن خودتراکم حاوی دوده سیلیس است ساخته شده و دو تیر دیگر با استفاده از طرح اختلاط (LSF10) که مربوط به بتن خودتراکم سبک سازه‌ای حاوی سبکدانه لیکا است و طرح اختلاط (ESF10) که مربوط به بتن خودتراکم سبک سازه‌ای حاوی سبکدانه پلی‌استایرن منبسط شده است ساخته شده‌اند. جزئیات طرح اختلاط تیرها در جدول ۳ ذکر گردیده است. لازم به ذکر است که از هر تیر سه عدد ساخته شده و نتایج به صورت میانگین ارائه شده است. قالب تیرها پس از گذشت ۲۴ ساعت از بتن‌ریزی باز شده و پس از آن به منظور فراهم آوردن شرایط عمل‌آوری تیرها در داخل استخر آب قرار داده شدند. تیرها پس از گذشت ۲۸ روز از عمل‌آوری از آب خارج شده و به مدت یک هفته در محیط آزمایشگاهی نگهداشته شده‌اند تا کاملاً خشک شده و آماده انجام مراحل بعدی آزمایش شوند. کلیه میلگردهای به کار رفته از نوع AIII با تنش نهایی  $4000 \text{ Kg/cm}^2$  است.

### ۵-۲- لوازم و تجهیزات اندازه‌گیری، بارگذاری

برای بارگذاری تیرهای بتنی از دستگاه یونیورسال کنترل بار با ظرفیت ۲۰۰ KN استفاده شد (شکل ۵). برای اندازه‌گیری خیزها از تغییر مکان‌سنج‌های مکانیکی با دقت  $0.0001$  اینچ استفاده شد که توسط پایه‌های فلزی به سطح بتن نصب شده بودند (شکل ۶). از میان چهار تغییر مکان‌سنج، دو تغییر مکان‌سنج بر روی سطح جانبی بتن و در سطح هم‌تراز با میلگردهای فشاری و کششی طولی در وسط تیر به ترتیب برای اندازه‌گیری مقادیر کرنش فشاری و کششی بتن نصب گردیدند. دو تغییر مکان‌سنج مکانیکی دیگر در وسط تیر و در راستای

اعمال بار برای اندازه‌گیری مقادیر خیز تیرها نصب گردیدند. نحوه قرارگیری تیر بتنی بر روی دستگاه بارگذاری یونیورسال در شکل ۷ نشان داده شده است. نحوه گسیختگی تیرها در شکل ۸ نمایش داده شده است. ترک‌ها در ناحیه لنگر ثابت بین دو نقطه بارگذاری گسترش پیدا کرده و ترک اصلی در محل قرار دادن گیج‌ها در ناحیه کششی رخ داده است.

### ۵-۳- محاسبه مدول گسیختگی، لنگر و تغییر مکان

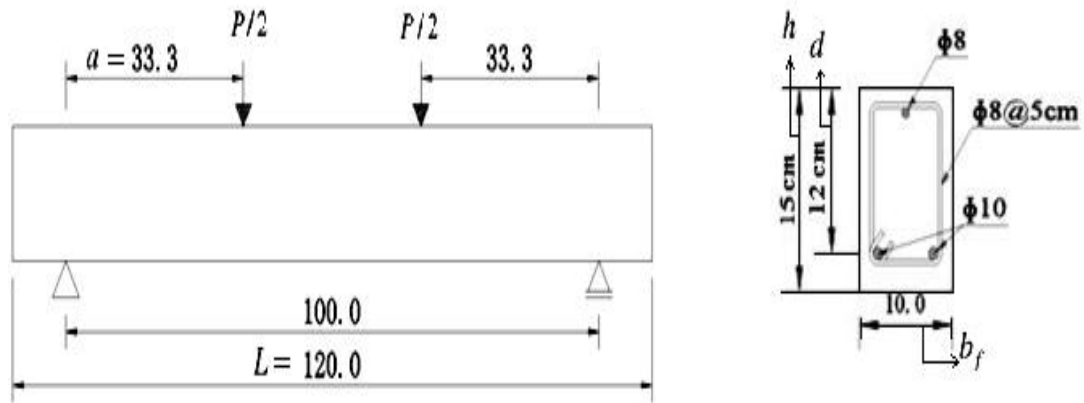
**حد ترک خوردگی بر اساس آیین‌نامه 318M-11 ACI**  
در جدول ۵ مقادیر مربوط به مدول گسیختگی، لنگر ترک خوردگی و تغییر مکان نظیر حد ترک خوردگی با استفاده از آیین‌نامه 318 ACI محاسبه شده است. مدول الاستیسیته  $E_c$  با توجه به رابطه ۱ تعیین شده است.

$$E_c = w_c^{1.5} 0.043 \sqrt{f'_c} \quad \text{رابطه ۱}$$

در رابطه ۱،  $f'_c$  مقاومت فشاری مشخصه بتن و  $W_c$  چگالی تعادلی بتن است و از شکل ۲ برداشت شده است.  $\lambda$  ضریب کاهش مقاومت بتن سبک است. در بتن خودتراکم سبک حاوی لیکا از مقدار توصیه شده توسط آیین‌نامه که در جهت اطمینان است استفاده کرده‌ایم، این ضریب برای بتن‌های سبک ماسه‌ای که تمامی درشت‌دانه‌ها سبک و ریزدانه‌ها ماسه می‌باشند  $0.85$  در نظر گرفته شده است. از آنجایی که در بتن خودتراکم سبک حاوی EPS بخشی از شن و ماسه با سبکدانه جایگزین شده، ضریب اثر بتن سبک با استفاده از رابطه ۲ محاسبه شده است. ضریب اثر بتن سبک  $0.83$  به دست آمده است که کوچکتر از  $0.85$  می‌باشد. لذا در بتن خودتراکم سبک حاوی EPS ضریب اثر بتن سبک را  $0.83$  در نظر گرفته‌ایم.

$$\frac{f_{ct}}{0.56 \sqrt{f'_c}} \leq 1 \quad \text{رابطه ۲}$$

در رابطه ۲،  $f_{ct}$  مقاومت کششی دو نیم شدن بتن سبک بوده و از شکل ۳ برداشت شده است. با توجه به توضیحات ذکر شده مقادیر مدول گسیختگی ( $f_r$ )، لنگر ترک خوردگی ( $M_{cr}$ ) و تغییر مکان نظیر حد ترک خوردگی ( $\Delta_{cr}$ ) به ترتیب با استفاده

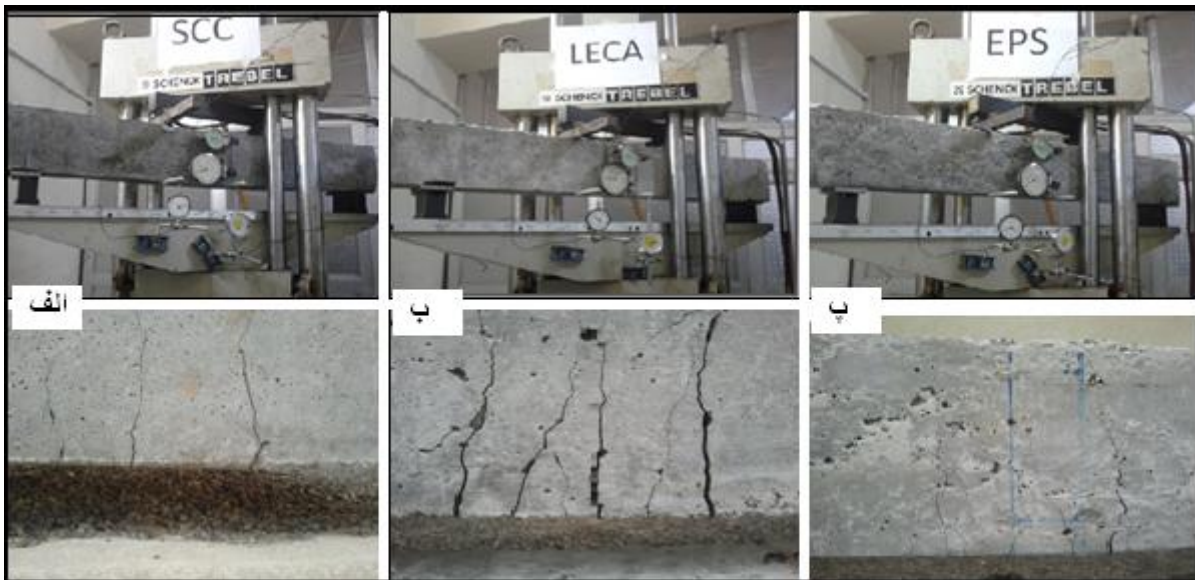


شکل ۴- مقطع طولی و عرضی تیرهای بتن مسلح



شکل ۶- اتصال کرنش سنج به سطح بتن با پایه‌های فلزی

شکل ۵- دستگاه بارگذاری



شکل ۷- بارگذاری و نحوه انتشار ترک در لحظه گسیختگی

الف) تیر بتنی خودتراکم؛ ب) تیر بتنی خودتراکم سبک حاوی لیکا؛ پ) تیر بتنی خودتراکم سبک حاوی EPS



شکل ۸- مقایسه نحوه ترک خوردگی تیرها و خیز آنها در زمان گسیختگی

از روابط ۳، ۴ و ۵ محاسبه شده و در جدول ۵ نمایش داده شده‌اند.

در طراحی خمشی تیر بتنی نمودار لنگر خمشی- خیز به سه ناحیه خطی تقسیم می‌شود. این سه ناحیه در نمودار خیز- لنگر خمشی که توسط توتانجی و همکارانش بسط داده شده مشاهده می‌گردد ( شکل ۹). نقاط کنترلی این منحنی شامل خیز و لنگر حد ترک خوردگی ( $M_{cr}$ ,  $e_{cr}$ )، خیز و لنگر حد جاری شدن میلگردهای کششی ( $M_y$ ,  $y$ ) و خیز و لنگر حد نهایی ( $M_u$ ,  $u$ ) می‌باشند [۱۶]. در شکل‌های ۹، ۱۰ و ۱۱ نتایج حاصل از بارگذاری تیرهای بتنی به صورت نمودار لنگر - تغییر مکان نمایش داده شده‌اند. همچنین منحنی‌های ایده آل سازی شده مشابه نمودار توتانجی ( شکل ۹) رسم شده‌اند. در آنها نقاط کنترلی شامل خیز و لنگر حد ترک خوردگی ( $M_{cr}$ ,  $e_{cr}$ )، خیز و لنگر حد جاری شدن میلگردهای کششی ( $M_y$ ,  $y$ ) و خیز و لنگر حد نهایی ( $M_u$ ,  $u$ ) قابل مشاهده می‌باشند، با استفاده از این نمودارها لنگر ترک خوردگی تیر و تغییر مکان نظیر لنگر ترک خوردگی را تعیین می‌کنیم. با جایگذاری لنگر ترک خوردگی (نقاط کنترلی اول در شکل‌های ۱۰، ۱۱ و ۱۲) در رابطه ۶ مدول گسیختگی آزمایشگاهی تیرهای بتنی تعیین می‌شود. سپس با استفاده از رابطه ۷ ضریب  $\lambda_e$  برای طرح اختلاط‌های حاوی لیکا و پلی‌استایرن منبسط شده تعیین می‌گردد، نتایج محاسبات در جدول ۶ نمایش داده شده است.

$$f_{re} = \frac{M_{cr} \times h}{2 \times I_g} \quad \text{رابطه ۶}$$

$$\lambda_e = \frac{f_{re}}{0.62 \times \sqrt{f'_c}} \quad \text{رابطه ۷}$$

$$f_r = 0.62 \times \lambda \times \sqrt{f'_c} \quad \text{رابطه ۳}$$

$$M_{cr} = \frac{2 \times f_r \times I_g}{h} \quad \text{رابطه ۴}$$

$$\Delta_{cr} = \frac{M_{cr}}{24 \times E_c \times I_g} (3L^2 - 4a^2) \quad \text{رابطه ۵}$$

$I_g$  ممان اینرسی مقطع تیر بتنی و  $E_c$  مدول الاستیسیته بتن است. مقادیر  $L$ ،  $a$  و  $h$  در شکل ۳ نمایش داده شده‌اند.

همان‌طور که از جدول ۵ مشخص است بیشترین مدول گسیختگی و لنگر ترک خوردگی و کمترین تغییر مکان حد ترک خوردگی به بتن خودتراکم فاقد سبک‌دانه (طرح SF10) تعلق دارند. حضور سبک‌دانه باعث کاهش مدول گسیختگی و لنگر ترک خوردگی و افزایش خیز در لحظه ترک خوردن می‌شود. بتن خودتراکم سبک حاوی EPS (طرح ESF10) با وجود اینکه وزنی تقریباً برابر با طرح اختلاط حاوی لیکا (طرح LSF10) دارد ولی مدول گسیختگی و لنگر ترک خوردگی آن کمتر از طرح اختلاط حاوی لیکا می‌باشد. خیز نظیر لنگر ترک خوردگی در هر دو طرح اختلاط حاوی بتن خودتراکم سبک سازه‌ای تقریباً با هم برابر است.

۶- بررسی نتایج آزمایشگاهی تیرهای بتنی  
۶-۱- رسم دیاگرام لنگر - تغییر مکان و بررسی پارمترهای طراحی در حد ترک خوردگی



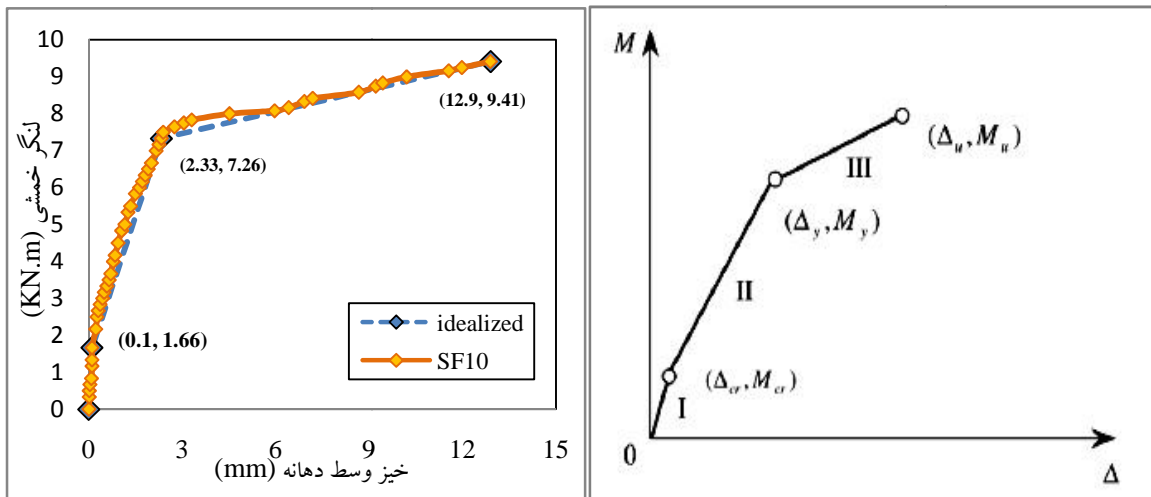
که کلیه سنگدانه‌های آن سبک می‌باشند یعنی ۰/۷۵ استفاده شود. عدم در نظر گرفتن این نکته می‌تواند باعث بروز خطا در محاسبه ظرفیت لنگر ترک خوردگی بتن شود. در شکل ۱۴ به طور همزمان لنگر و تغییر مکان وسط دهانه در تیرهای مختلف مقایسه شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود در حد ترک خوردگی بیشترین خیز وسط دهانه ( $\Delta_{cre}$ ) مربوط به طرح LSF10 می‌باشد.

خیز تیر بتنی سبک خود تراکم حاوی EPS نیز نسبت به تیر فاقد سبکدانه افزایش یافته است. لذا برخلاف کاهش ظرفیت خمشی تیرها در حد ترک خوردگی شکل پذیریشان با استفاده از سبکدانه‌ها افزایش پیدا کرده است. روابط آیین‌نامه در مورد تغییر مکان تیرها همیشه در جهت اطمینان است. یکی از دلایل این موضوع می‌تواند بزرگتر بودن مدول الاستیسیته واقعی بتن (شکل ۳) نسبت به مدول الاستیسیته محاسباتی (جدول ۲) باشد. لنگر ترک خوردگی رابطه مستقیمی با مدول گسیختگی بتن دارد. بنابراین در طرح اختلاط ESF10،  $M_{cr}$  بزرگتر از  $M_{cr}$  و در خلاف جهت اطمینان است. لذا توصیه می‌شود در تعیین لنگر خمشی ترک خوردگی نیز نکاتی که پیشتر در مورد تعیین ضریب  $\lambda$  گفته شد رعایت شود.

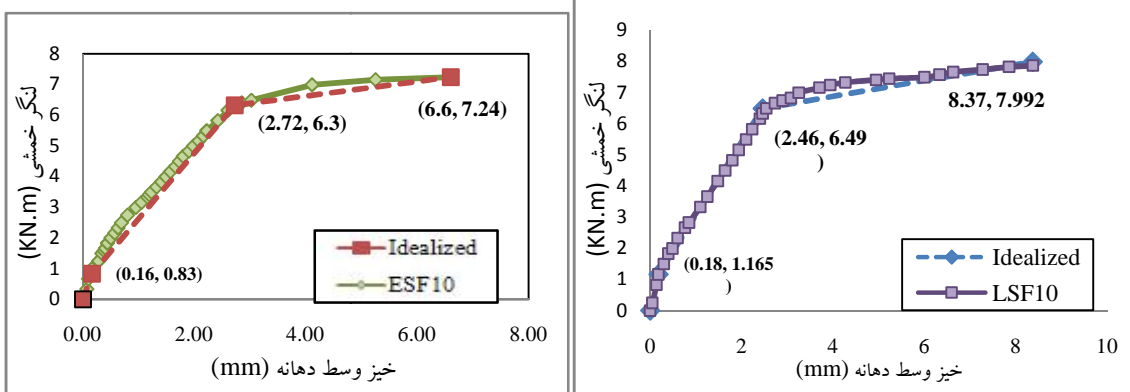
شکل‌های ۱۳ و ۱۴ با توجه به نتایج آزمایشگاهی ذکر شده در جدول ۵ و مقادیر محاسبه شده در جدول ۶ رسم شده‌اند، شکل ۱۳ به طور همزمان ضریب  $\lambda$  و مدول گسیختگی را در طرح اختلاط‌های مختلف با هم مقایسه می‌کند. همانطور که پیشتر نیز به آن اشاره شد، آیین‌نامه ACI 318، ضریب  $\lambda$  را برای بتن‌های سبک ماسه‌ای ۰/۸۵ توصیه می‌کند. در طرح اختلاط LSF10 که بتن سبک ماسه‌ای است ضریب  $\lambda$  توصیه شده آیین‌نامه نسبت به مقدار آزمایشگاهی در جهت اطمینان و از آن کمتر می‌باشد. در طرح LSF10 مدول گسیختگی محاسباتی نیز از مقدار بدست آمده در آزمایشگاه بزرگتر بوده و در جهت اطمینان است. طرح اختلاط ESF10 جزو دسته‌بندی‌های آیین‌نامه ACI 318 قرار نمی‌گیرد زیرا بخشی از شن و ماسه بتن با EPS جایگزین شده است. برای این بتن مطابق جدول ۵ ضریب  $\lambda$  به دست آمده با روابط آیین‌نامه ۰/۸۳ است حال آنکه بررسی تیرها حاکی از این است که این ضریب ۰/۷۹۲ می‌باشد چنانچه در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود. این موضوع به بروز خطا در محاسبه مدول گسیختگی منجر شده است. بنابراین پیشنهاد می‌شود به جای استفاده از رابطه ذکر شده در آیین‌نامه (رابطه ۲) یا ضریب  $\lambda$  به طور عملی تعیین شود و یا از مقدار توصیه شده توسط آیین‌نامه برای بتن‌های سبکی

جدول ۵- محاسبه مدول گسیختگی، لنگر و تغییر مکان حد ترک خوردگی بر اساس ACI 318M-11

نام طرح	مقادیر آزمایشگاهی			مقادیر محاسبه شده بر اساس استاندارد ACI 318M-11					
	$f'_c$ MPa	MPa	Kg/cm <sup>4</sup>	mm <sup>4</sup>	MPa	$f_r$ MPa	$M_{cr}$ KN.m	mm	
SF10	۴۴	۴/۳۶	۲۳۳۳	$۱۰^۳ \times ۲۸۱۲۵$	۳۲۱۴۱/۵	۱	۴/۱۱	۱/۵۴	۰/۱۸
LSF10	۲۷/۱۶	۳	۱۷۶۷	$۱۰^۳ \times ۲۸۱۲۵$	۱۶۶۴۵/۱	۰/۸۵	۲/۷۴	۱/۰۲	۰/۲۳
ESF10	۲۰/۳۷	۲/۱	۱۸۰۰	$۱۰^۳ \times ۲۸۱۲۵$	۱۴۸۲۰/۸	۰/۸۳	۲/۳۲	۰/۸۷	۰/۲۲



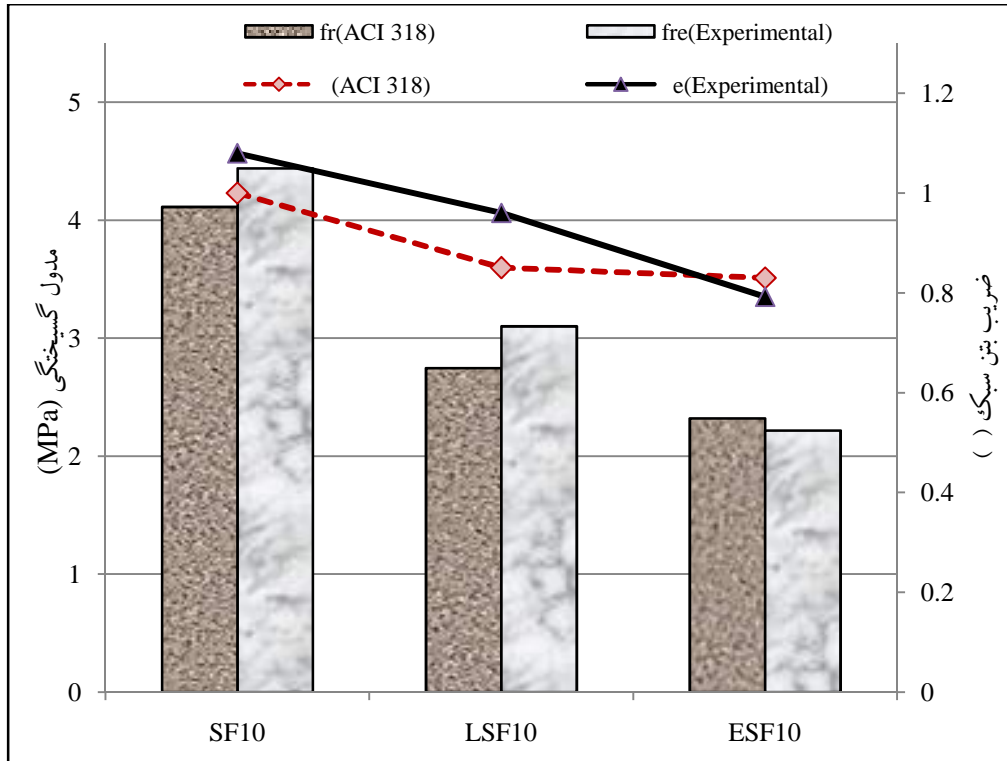
شکل ۹- نمودار ایده آل لنگر- تغییر مکان توتانجی [۱۶] / شکل ۱۰- نمودار لنگر- تغییر مکان برای تیر (SF10)



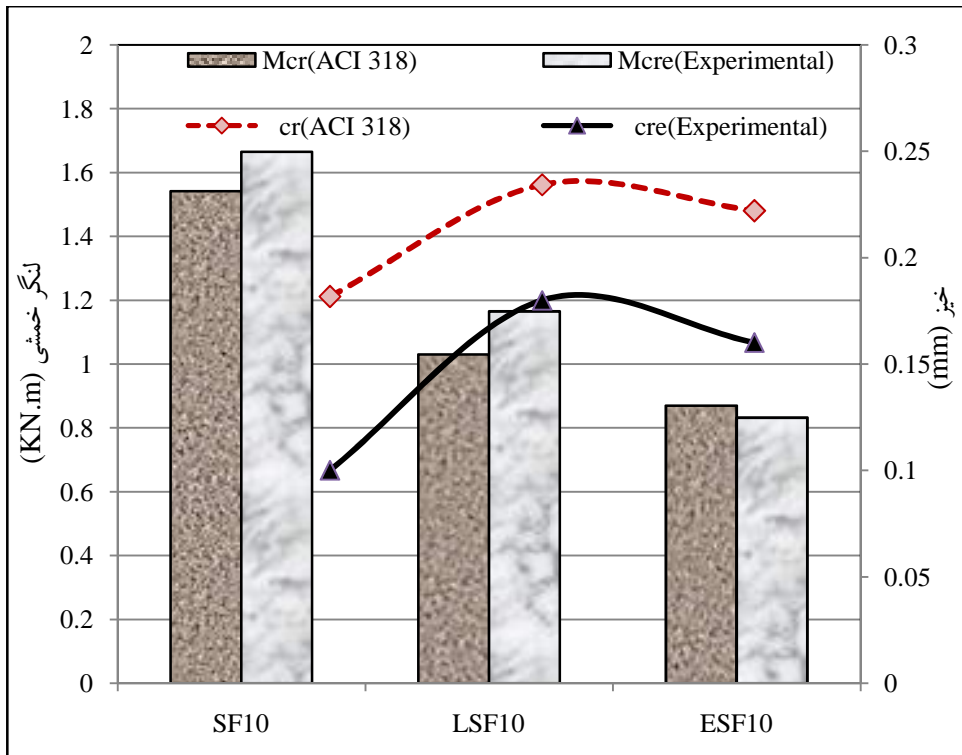
شکل ۱۱- نمودار لنگر- تغییر مکان برای تیر (LSF10) / شکل ۱۲- نمودار لنگر- تغییر مکان برای تیر (ESF10)

جدول ۶- مقادیر آزمایشگاهی مدول گسیختگی، لنگر و تغییر مکان حد ترک خوردگی و ضریب بتن سبک

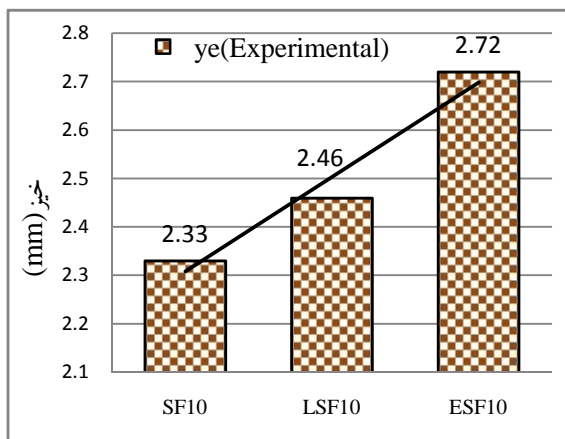
نام طرح	مقادیر آزمایشگاهی					
	$f_{re}$ MPa	$I_{cr}$ $mm^4$	$M_{cre}$ KN.m	$\lambda_e$ mm	$f_{re}$ MPa	$\lambda_e$
SF10	۴۴	$10^3 \times 28125$	۱/۶۶۵	۰/۱	۴/۴۴	۱/۰۷۹
LSF10	۲۷/۱۶	$10^3 \times 28125$	۱/۱۶۵	۰/۱۸	۳/۱۰۶	۰/۹۶
ESF10	۲۰/۳۷	$10^3 \times 28125$	۰/۸۳۲	۰/۱۶	۲/۲۱۸	۰/۷۹۲



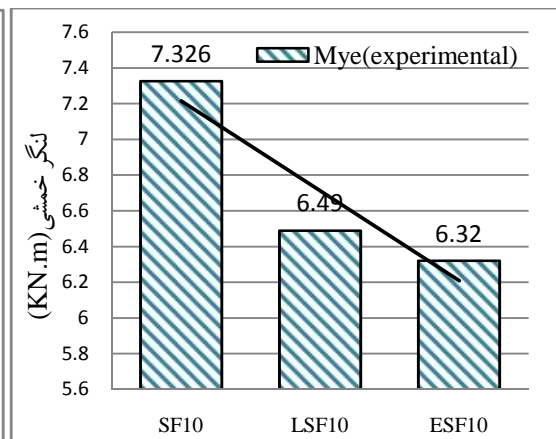
شکل ۱۳- مدول گسیختگی و ضریب بتن سبک در حد ترک خوردگی



شکل ۱۴- لنگر و خیز نظیر وسط دهانه در حد ترک خوردگی

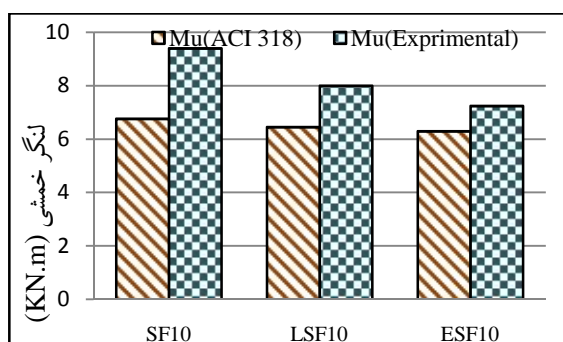


شکل ۱۶- خیز نظیر حد بهره‌برداری

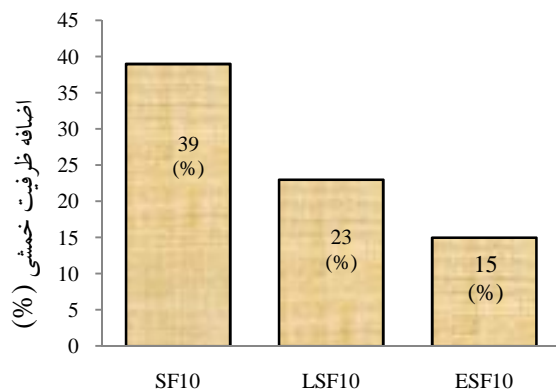


شکل ۱۵- ظرفیت خمشی در حد بهره‌برداری

همواره مقداری اضافه ظرفیت در تیر واقعی باقی می‌ماند. در شکل ۱۸ اضافه ظرفیت خمشی نهایی در صورت استفاده از روابط آیین‌نامه ACI 318 مشاهده می‌شود. در مورد بتن خودتراکم و بتن خودتراکم سبک حاوی لیکا با ضریب اطمینان خوبی قادر به استفاده از روابط آیین‌نامه برای محاسبه ظرفیت خمشی تیرهای بتنی ساخته شده می‌باشیم. در مورد تیر بتنی حاوی EPS باید به کاهش ضریب اطمینان روابط آیین‌نامه توجه داشت.



شکل ۱۷- ظرفیت خمشی در حد نهایی



شکل ۱۸- اضافه ظرفیت خمشی در صورت استفاده از ACI

## ۲-۶- کنترل خیز نظیر حد بهره‌برداری:

ظرفیت خمشی ( $M_{ye}$ ) و خیز وسط دهانه ( $y_e$ ) تیرهای بتنی در حد بهره‌برداری (نقطه کنترلی دوم در نمودارهای ۱۰، ۱۱ و ۱۲) در دو شکل ۱۵ و ۱۶ نشان داده شده‌اند. مطابق شکل ۱۵ لنگر نظیر حد بهره‌برداری با حضور سبکدانه‌ها کاهش پیدا کرده است و کمترین ظرفیت خمشی مربوط به طرح ESF10 می‌باشد.

شکل ۱۶ حاکی از افزایش خیز تیرهای بتنی حاوی سبکدانه استدر این حالت طرح اختلاط ESF10 بیشترینخیز را دارد. افزایش خیز تیرهای حاوی سبکدانه به ویژه در کنترل خیز تیرها و دال‌ها به منظور عدم آسیب‌رسانی به اعضای غیرسازه‌ای متصل به آنها اهمیت دارد.

## ۳-۶- نتایج ظرفیت خمشی نظیر حد نهایی:

ظرفیت خمشی تیرهای بتنی در حد نهایی ( $M_{ue}$ ) یعنی (نقطه کنترلی سوم در نمودارهای ۱۰، ۱۱ و ۱۲) و ظرفیت خمشی محاسباتی تیرهای بتن مسلح با فولاد مضاعف ( $M_{II}$ ) بر طبق ACI 318M-11 در شکل ۱۷ ترسیم و با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

نکته قابل توجه این است که مطابق آیین‌نامه کرنش نهایی بتن سبک ۰/۰۰۳ باید در نظر گرفته شود حال آنکه ممکن است کرنش نهایی واقعی بتن با این عدد تفاوت داشته باشد. همانطور که در شکل ۱۷ مشاهده می‌شود به کارگیری روابط و توصیه‌های آیین‌نامه در مورد تیرهای بتنی سبک حاوی لیکا و EPS به خوبی می‌تواند لنگر نهایی بتن را محاسبه کند و

## ۷- نتیجه گیری

خیز تیرهای بتنی ساخته شده با استفاده از بتن خودتراکم سبک چه در حد ترک خوردگی و چه در حد نهایی بیش از تیرهای بتنی ساخته شده با بتن خودتراکم معمولی می باشد که این امر باید در طراحی اعضای غیر سازه‌ای متصل به آنها لحاظ شود. با استفاده از روابط ذکر شده در آیین نامه ACI 318M-11 می توان ظرفیت خمشی نهایی تیرهای بتنی سبک حاوی سبکدانه لیکا یا EPS را با ضریب اطمینان مناسبی تعیین کرد.

با استفاده از روابط آیین نامه ACI بیشترین مدول گسیختگی و لنگر ترک خوردگی و کمترین تغییر مکان حد ترک خوردگی به بتن خودتراکم فاقد سبکدانه (طرح SF10) تعلق دارند. حضور سبکدانه باعث کاهش مدول گسیختگی و لنگر ترک خوردگی و افزایش خیز در لحظه ترک خوردن بتن می شود. بتن خودتراکم سبک حاوی EPS (طرح ESF10) با وجود اینکه وزنی تقریباً برابر طرح اختلاط حاوی لیکا (طرح LSF10) دارد ولی مدول گسیختگی و لنگر ترک خوردگی آن کمتر از طرح اختلاط حاوی لیکا می باشد.

## ۸- مراجع

- [1].K.H. Khayat, "Workability, Testing and Performance of Self Consolidated Concrete", ACI Materials Journal, V.96 No. 3, May-June, 1999, pp 346-352.
- [2].K.H. Khayat, J. Assaad., J. Daczko, "Comparison of Field-oriented Test Methods to Assess Dynamic Stability of Self-Consolidated Concrete," ACI Material Journal, V. 101 No. 2, March-April, 2004, pp 168-176.
- [3].L.,A. Mata, "Implementation of Self-Compacting Concrete (SCC) for Prestressed Concrete Girders" Master of Science Thesis North Carolina State University November 2004.
- [4].Mazaheripour, H.; Ganbarpour, S.; Mirmoradi,SH.; Hosseinpour I.; The effect of polypropylene fibers on the properties of fresh and hardened lightweight selfcompacting concrete, construction and Building Materials, 2011, Vol.25 , 351-8.
- [5]. Topcu I. B.; Uygunoglu T.; Effect of aggregate type on properties of hardened self-consolidating lightweight concrete (SCLC), Construction and Building Materials, 2010, Vol.24, 1286-95.
- [6]. Kim, Y.J.;Choi,Y.W.; Lachemi,M.; Characteristics of self -consolidating concrete using two types of lightweight coarse aggregates, Construction and Building Materials, 2010, Vol.24, 11-16.
- [7]. Choi, Y . W.; Kim, Y.J.; Shin, H.C.; Moon, H. Y.; An experimental research on the fluidity and mechanical properties of high-strength light weight self-compacting concrete, Cement and Concrete Reserch , 2006, Vol.36, 1595-602.
- [8].Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary; ACI Committee 318,

- خیز نظیر لنگر ترک خوردگی در هر دو طرح اختلاط حاوی بتن خودتراکم سبک سازه‌ای تقریباً با هم برابر است.  
- در طرح SF10 که مربوط به بتن خودتراکم با سنگدانه‌های طبیعی می باشد، لنگر ترک خوردگی و مدول گسیختگی تعیین شده در آزمایشگاه بزرگتر از مقادیر محاسبه شده توسط فرمول های ACI می باشند لذا کاربرد روابط آیین نامه برای محاسبه لنگر ترک خوردگی در جهت اطمینان است. در طرح LSF10 که مربوط به بتن خودتراکم سبک حاوی لیکا می باشد، لنگر ترک خوردگی و مدول گسیختگی تعیین شده در آزمایشگاه بزرگتر از مقادیر محاسبه شده توسط فرمول های ACI می باشند. لذا کاربرد روابط آیین نامه برای محاسبه لنگر ترک خوردگی در جهت اطمینان است. در طرح ESF10 که مربوط به بتن خودتراکم سبک حاوی EPS است، لنگر ترک خوردگی و مدول گسیختگی تعیین شده در آزمایشگاه کوچکتر از مقادیر محاسبه شده توسط فرمول های ACI هستند لذا کاربرد روابط آیین نامه برای محاسبه لنگر ترک خوردگی صحیح نمی باشد.

-ضریب اثر بتن سبک ( ) در تیر بتن مسلح سبک حاوی سبکدانه EPS در آزمایشگاه ۰/۷۹۲ به دست آمده است. در صورتی که طبق روابط آیین نامه این مقدار ۰/۸۳ می باشد. لذا توصیه می شود در صورت استفاده از این بتن در اعضای سازه‌ای حتماً با ساخت آزمون‌هایی، ضریب تاثیر بتن سبک تعیین گردد و یا در جهت اطمینان از ضریب ۰/۷۵ استفاده شود.

- [13]. Tommy Y.Lo, W.C. Tang, H.Z. Cui, The effect of aggregate properties on lightweight concrete, *Building and Environment* 42 (2007) 3025-3029.
- [14]. Khayat, K. H.;Bickley, J.; Lessard, M.; Performance of self-consolidating concrete for casting basement and foundation walls, *ACI Material journal*, 2000,Vol.97,374-80.
- [15]. EFNARC,The European guidelines for self-compacting concrete; specification production and use, May 2005.
- [16]. Toutanji, H., Zhao, L., Zhang, Y. "Flexural behavior of reinforced concrete beams externally strengthened with CFRP sheets bonded with an inorganic matrix." *Engineering Structures* 2006; 28(4): 557-566.
- 2011, P.434.
- [9].Shideler, J.J; Lightweight-Aggregate Concrete for Structural Use; *ACI Jurnal*, V.54, No.4, Oct. 1957, PP. 299-328.
- [10]. Babu, K.G., Babu, D. S.; Performance of fly ash concretes containing lightweight EPS aggregates , *Cement & Concrete Composites*, 2004, Vol.26, 605-11.
- [11]. Babu, K.G., Babu, D. S.; Behaviour of lightweight expanded polystyrene concrete containing silica fume , *Cement and Concrete Research*, 2003, Vol.33, 755-62.
- [12]. A. Sadrumontazi, J. Sobhani, M.A.Mirgozar, M.Najimi; Properties of multi-strength EPS concrete containing silica fume and rice husk ash; *Construction and Building Materials* 35(2012) 211-219.

## Study on Design Relations of Structural Lightweight Self-Compacting Concrete Beams Containing Light Expanded Clay and EPS

A. Sadr Momtazi\*

Associate Professor, University of Guilan

H. Nosrati

M.Sc. , University of Guilan

( Received: 2013/8/20 - Accepted: 2013/11/20)

### Abstract

The use of lightweight materials in construction industry reduces dead weight of structure and earthquake force acting upon it. On the other hand, the use of lightweight aggregates consider as a way to conserve existing natural aggregate mines. Self-Compacting Concrete (SCC) is a new type of high performance concretes that flows under its own weight, passes through the reinforcements and fills all the corners of frameworks completely, The use of SCC is growing increasingly because of its great advantages such as eliminating the vibration of the concrete, reducing noise pollution during the construction time, having high workability and et.

In this paper the effects of using two different artificial lightweight materials including light Expanded Clay Aggregates (LECA) and Expanded Poly-Styrene (EPS) on SCC are investigated. Fresh concrete requirement and the possibility of classification as lightweight self compacting concrete at hardened condition is determined. In order to evaluate structural lightweight self compacting beams, reinforced concrete beams were made of LECA and EPS and their design coefficient, bending capacity, modulus of rupture and deflection, compared with the normal weight SCC and also compared with the corresponding calculated values based on ACI 318. The results show that the proposed relationships by ACI 318 code, are reliable when LECA is applied as lightweight aggregates, In this type of concrete, coefficient of lightweight concrete ( $\gamma_c$ ) and bending capacity calculated by ACI 318 is smaller than corresponding experimental values, and calculated deflection is greater than experimental deflection. but the proposed design relationships by ACI 318 code, aren't reliable when EPS is applied as lightweight aggregates, In EPS concrete, coefficient of lightweight concrete ( $\gamma_c$ ), bending capacity and modulus of rupture calculated by ACI 318 is greater than corresponding experimental values,

**Key words:** Beam, Design Relations, Structural Lightweight self Compacting Concrete, LECA, EPS

\*Corresponding author: Sadrmomtazi@yahoo.com