

بررسی مشخصات مکانیکی و منحنی تنش - کرنش بتن سبک‌دانه موجود در ایران

مصطفی خانزادی^{۱*}، علیرضا چاله‌کایی^۲

۱- استادیار، دانشکده عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران

۲- کارشناس ارشد، دانشکده عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران

khanzadi@iust.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۰/۱۲/۲۰

تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۱۰/۰۷

چکیده - در این پژوهش امکان استفاده از سنگدانه‌های اسکوریا و لیکای موجود در کشور برای تولید بتن سبک‌دانه پرمقاومت بررسی شده است. براساس طرح‌های گوناگون اختلاط و روش‌های مرسوم، تولید بتن سبک‌دانه‌ای با مقاومت فشاری ۲۸ روزهی بیشتر از ۴۰ مگاپاسکال که بتوان آنرا در بتن مسلح به‌کار برد، ممکن شد. برای بررسی مشخصات مکانیکی کوتاه‌مدت این بتن، آزمایش‌های مختلفی چون وزن مخصوص بتن، مقاومت فشاری، مدول الاستیسیته استاتیکی و ضریب پواسون انجام شد؛ روابطی نیز برای پیش‌بینی مدول الاستیسیته استاتیکی این بتن‌ها براساس مقاومت فشاری و وزن مخصوصشان در سن ۲۸ روز ارائه شده است. مشخص شد که با افزایش وزن بتن با تغییر در بافت دانه‌بندی، مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته بتن‌های آزمایش‌شده، افزایش یافته است. استفاده از دوده سیلیسی نیز در بهبود مقاومت فشاری این بتن‌ها مؤثر بوده است. نتایج نشان می‌دهند که اسکوریا و لیکا در بهبود مشخصات مکانیکی نمونه‌ها مؤثر بوده که اسکوریا به نتایج مناسب‌تری رسیده است. منحنی تنش - کرنش بتن‌های مطالعه‌شده بررسی شد و توصیه‌هایی برای تخمین این منحنی‌ها ارائه شد. بر اساس نتایج، منحنی‌ها در شاخه‌های صعودی و نزولی تقریباً خطی بودند.

واژگان کلیدی: بتن سبک‌دانه، لیکا، اسکوریا، مشخصات مکانیکی، منحنی تنش - کرنش

۱ - مقدمه

آورده‌اند که به خاطر حفرات هوای موجود در سبک‌دانه‌ها، این بتن دارای نسبت بالای مقاومت به وزن، مقاومت کششی مناسب، ضریب انبساط حرارتی پایین و ویژگی‌های برتر عایق بودن در مقابل گرما و صدا را دارد. افزون بر این، در بتن سبک‌تر، مقطع عرضی اعضای سازه‌ای کوچک‌تر می‌شود و اجرا اقتصادی‌تر خواهد شد. تولید هر بتن سبک‌دانه کاملاً به در دسترس بودن

تولید بتن سبک افزایش یافته و تقاضا برای مصالح سبک با مشخصات مکانیکی قابل قبول برای ساخت و ساز هم افزایش می‌یابد. بتن سبک شامل انواع مختلف بتن، از بتن کم‌مقاومت که بیشتر در تولید بلوک‌های غیرسازه‌ای به‌کار می‌رود تا بتن‌های سازه‌ای با مقاومت فشاری بیش از ۱۰۰ مگاپاسکال می‌شود. محققین بسیاری [۱-۳] در تحقیقاتشان

داشتن بتن سبک‌دانه سازه‌ای و پرمقاومت، سبک‌دانه‌ها به عنوان جایگزین بخشی از سنگ‌دانه‌های معمولی یا همه آن به کار می‌رود. به طور کلی سبک‌دانه‌ها به دو نوع طبیعی و مصنوعی تقسیم می‌شوند. سبک‌دانه طبیعی را پس از استخراج از معدن، مستقیماً دانه‌بندی کرده و در بتن به کار می‌برند. یکی از رایج‌ترین سبک‌دانه‌های طبیعی موجود در ایران "اسکوریا" است که در زبان عام با عنوان "سنگ پا" شناخته می‌شود. اسکوریا منشأ آذرین دارد و جزء پوک‌های معدنی است. این سنگ بیشتر در دهانه کوه‌های آتشفشانی و از گدازه‌های مذابی که سیلیس کمی دارند (بازالت^۵) ایجاد می‌شود. رنگ آن تیره است و می‌تواند به رنگ‌های قهوه‌ای مایل به قرمز، قرمز، خاکستری و یا سیاه باشد. بیشتر این سنگ‌ها وزن مخصوصی بیشتر از یک دارند [۱۱]. تاکنون این ماده کاربرد چندانی در تولید اعضای سازه‌ای نداشته است و تحقیقات کمی در مورد استفاده از اسکوریا در بتن سبک پرمقاومت انجام شده است. معادن اسکوریا در غرب و شمال غرب کشور قابل توجه است. از جمله سبک‌دانه‌های مصنوعی، رس منبسط‌شده است که اغلب لیکا نامیده می‌شود. در کشورهای مختلف با لیکا، بتن‌های تمام‌سبک‌دانه یا نیمه‌سبک‌دانه سازه‌ای را می‌سازند. در کشور ما لیکای سبکی تولید می‌شود که معمولاً برای ساخت بتن‌های پرکننده، شیب‌بندی بام‌ها و ساخت بلوک‌های سبک که کاربرد نیمه سازه‌ای دارد، استفاده می‌شود. تحقیقات مختلفی سعی در تعیین مقاومت فشاری بتن‌های ساخته شده با لیکای ایران را در شرایط مختلف داشته است. مشخص‌ترین روابطی که برای تخمین منحنی تنش - کرنش ارائه شده در شکل (۱) آورده شده است. منحنی تودچینی به دلیل تابع پیوسته آن، برای مطالعات تحلیلی مناسب است [۱۲].

سبک‌دانه‌ها مرتبط است [۴]. برخی محققین [۳، ۴] در تحقیقاتشان روی بتن‌های سبک‌دانه حاوی سبک‌دانه‌های طبیعی چون توف^۱ و پرلیت^۲ یا سبک‌دانه‌های مصنوعی چون رس منبسط‌شده یا شل^۳ مطالعه کرده‌اند. آن‌ها به این نتیجه رسیده‌اند که افزودنی‌هایی مانند خاکستر بادی، میکروسیلیس و پوزولان‌های طبیعی در بتن سبک، سبب بهبود مشخصات مختلفی در بتن می‌شود؛ چرا که واکنش‌های پوزولانی منجر به بهبود مشخصات مکانیکی می‌شود [۵]. مقاومت فشاری در بتن سبک سازه‌ای، ۲۱ تا ۲۸ مگاپاسکال است [۶] که با کاهش نسبت آب به مواد چسبنده، افزایش سیمان، کاهش بیشینه اندازه ذرات، جایگزینی ماسه سبک‌دانه با ماسه طبیعی و استفاده از افزودنی‌ها این مقاومت افزایش می‌یابد.

ضعیف‌ترین جزء بتن سبک، ماتریس سیمان یا منطقه تماسی^۴ نیست، بلکه سبک‌دانه است. به همین دلیل مشخصات مکانیکی بتن سبک تنها با کیفیت ماتریس سیمان آن سنجیده نمی‌شود و مشخصات سبک‌دانه حجم سبک‌دانه‌ها در بتن و مشخصات سبک‌دانه نیز در این مورد موثرند [۳، ۷].

ژانگ و جوو [۸] تاثیر چگالی بتن سبک بر مقاومت فشاری و سازوکار گسیختگی بتن سبک پرمقاومت را بررسی کرده‌اند. محققین بسیاری اهمیت حجم کم سبک‌دانه در مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته بتن سبک‌دانه را تنها با چگالی‌شان می‌سنجند؛ چرا که سنجش مشخصات مکانیکی سبک‌دانه‌ها دشوار است [۳، ۹]. واسرمن و بتسور [۱۰] نشان داده‌اند که چگالی یکسان سنگدانه‌ها معمولاً سبب ایجاد مقاومت یکسان در بتن نمی‌شود.

بتن سبک را با روش‌های مختلفی تولید می‌کنند. برای

1- tuff
2- perlite
3- shale
4- interfacial transition zone

5- basalt

مرحله بعد، تعیین برخی از مشخصات مکانیکی کوتاه‌مدت این بتن مانند مقاومت فشاری و کششی و مدول الاستیسیته و بررسی منحنی تنش-کرنش آن است.

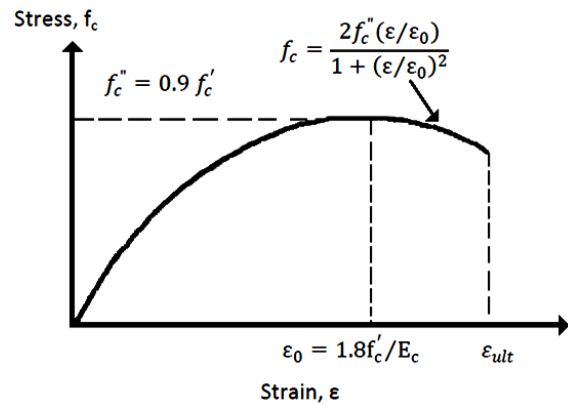
۲- اطلاعات آزمایشگاهی

۲-۱- مصالح مصرفی

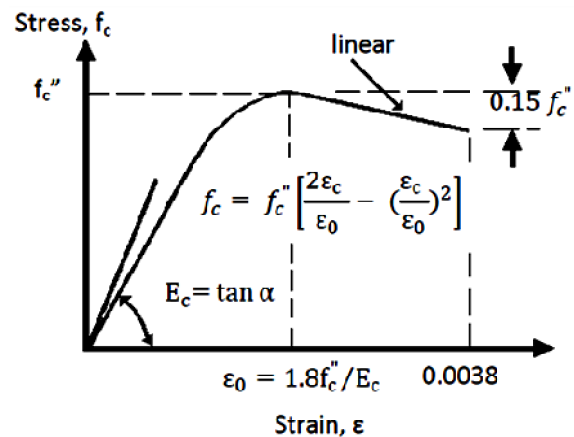
در ساخت همه نمونه‌ها، سیمان نوع I، دوده سیلیسی تولیدشده در شرکت صنایع فرآلیاژ ایران واقع در ازنا، لیکای درشت‌دانه ایرانی و اسکوریای استخراج‌شده از قروه با بیشینه اندازه ۱۲/۵ میلی‌متر به عنوان درشت‌دانه، ریزدانه معمولی تولیدی شرکت متوساک و همچنین افزودنی فوق‌روان‌کننده بر پایه نفتالین، محصول شرکت ب. آ. اس. اف ایرانیان استفاده شد. در همه نمونه‌ها از ریزدانه خشک معمولی و درشت‌دانه سبک خشک استفاده شده است. دانه‌بندی وزنی (درصد رده‌ها) سبک‌دانه‌های لیکا و اسکوریا در محدوده استاندارد ASTM C330 [۱۸] قرار داشت. سیمان و فوق‌روان‌کننده استفاده‌شده نیز به ترتیب منطبق بر ASTM C150 [۱۹] و ASTM C494 [۲۰] بوده است. وزن مخصوص فضایی خشک انبوهی (3Kg/m) برای لیکا و اسکوریا به ترتیب ۴۳۰ و ۷۰۲ و وزن مخصوص فضایی خشک متراکم با میله (3Kg/m) وزن‌ها ۵۰۷ و ۷۸۳ است. بیشترین میزان وزن مخصوص فضایی خشک انبوهی برای درشت‌دانه‌های سبک طبق استاندارد ASTM C330، (3Kg/m) ۸۸۰ قید شده است. جذب آب ۲۴ ساعته دانه‌های لیکا و اسکوریا به ترتیب ۸ و ۵ درصد می‌است.

۲-۲- اصول انتخاب مخلوط‌ها و نسبت‌های آن‌ها

شش مخلوط گوناگون برای مقایسه حجم سبک‌دانه‌ها با مشخصات فیزیکی بتن تهیه شد. در این طرح‌ها سبک‌دانه‌ها به مقدار ۱۰ درصد حجمشان با ماسه طبیعی



منحنی تودچینی [۱۴]



منحنی اصلاح‌شده هوگنستاد [۱۳]

شکل (۱) تخمین تحلیلی منحنی تنش-کرنش بتن

پوپویچ [۱۵] روابطی برای تخمین منحنی تنش-کرنش بتن‌های با مقاومت‌های پایین ارائه کرده است. تخمین‌هایی که وی در دامنه داده‌شده از آب به سیمان، مقاومت و سن زده است نسبت به تخمین از طریق دیگر روابط موجود، نتایج منطقی‌تری ارائه کرده است. کریرا و چو [۱۶] نیز رابطه دیگری ارائه کرده‌اند. بلچمن [۱۷] روابط متفاوتی را برای شاخه‌های صعودی و نزولی منحنی تنش-کرنش ارائه کرده است.

این پژوهش دو هدف دارد. ابتدا اثبات امکان استفاده از اسکوریا و لیکای موجود در کشور در تولید بتن سبک‌دانه پرمقاومت با افزودن میکروسیلیس و فوق‌روان‌کننده و در

مخلوط‌های بتن در جدول (۱) دیده می‌شود.

۳- نتایج و تفسیر آن‌ها

۳-۱- مقاومت فشاری

نمونه‌های استوانه استاندارد 150×300 میلی‌متر و مکعب 150 میلی‌متری ساخته و آزمایش مقاومت فشاری در سن ۲۸ روز روی آن انجام شد. نتایج آزمایش‌های مقاومت فشاری روی نمونه‌های ۲۸ روزه مکعب 150 سانتی‌متری و استوانه استاندارد و نیز وزن مخصوص خشک نمونه‌ها در جدول (۲) ارائه شده است.

بیشترین مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن‌های حاوی لیکا، طرح L3 است که در نمونه استوانه‌ای $38/4$ MPa و نمونه مکعبی $40/85$ MPa به دست آمده است. در این حالت وزن مخصوص بتن خشک 1735 kg/m^3 به دست آمده است. بیشترین مقاومت فشاری ۲۸ روزه بین بتن‌های حاوی اسکوریا مربوط به مخلوط S3 است که برای نمونه مکعبی برابر $54/63$ MPa و برای نمونه استوانه‌ای برابر $48/62$ MPa است. وزن مخصوص بتن خشک شده مربوط به این طرح حدود 1940 kg/m^3 به دست آمده است. نتایج مقاومت‌های فشاری ۲۸ روزه عملاً تابع وزن آزمونه‌ها است و با کاهش آن، مقاومت نیز کاهش می‌یابد. نسبت مقاومت فشاری نمونه‌های استوانه‌ای به مکعب برای بتن‌های حاوی لیکا حدود $0/93$ و برای نمونه‌های حاوی اسکوریا حدود $0/87$ ثبت شده است. افزایش بیشتر مقاومت با رعایت نکات اقتصادی و حفظ وزن مخصوص بتن خشک در محدوده بتن‌های سبک عملاً مقدور نیست. افزایش مقاومت بتن‌های حاوی لیکا در این پژوهش نسبت به تحقیقات گذشته در ایران به دلیل تفاوت نوع دانه‌ها با لیکاهای استفاده شده در آن تحقیقات است.

جایگزین شد. حروف L و S در عنوان هر طرح اختلاط به ترتیب بیانگر بتن حاوی لیکا و اسکوریا است. همه مخلوط‌های بتن با 500 کیلوگرم بر متر مکعب مواد سیمانی و نسبت وزنی سیمان به مواد سیمانی $0/3$ طرح شد. در این طرح‌ها 450 کیلوگرم سیمان پرتلند نوع I با 50 کیلوگرم دوده سیلیسی استفاده شد. از همه مخلوط‌ها آزمایش افت اسلامپ گرفته شد که میزان افت اسلامپ در همه اختلاط‌ها $10-8$ سانتی‌متر بوده است. برای دستیابی به کارایی مورد نظر، فوق‌روان‌کننده‌ای به میزان یک درصد وزن سیمان به بتن‌ها اضافه شد. از هر اختلاط، نمونه‌های مکعب 150 میلی‌متری، سیلندر استاندارد و سیلندر با طول 200 و قطر 100 میلی‌متر برای تعیین مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته در سن ۲۸ روز تهیه شد. همه نمونه‌ها در دو لایه روی میز ویبره متراکم شد. سطح آن‌ها پس از متراکم شدن تراز شده، با مال‌پراخت شد و به مدت یک روز در قالب نگه‌داری شد؛ سپس قالب‌ها باز شد و نمونه‌ها تا زمان انجام آزمایش در حوضچه آب با دمای 23 ± 2 درجه سانتی‌گراد عمل‌آوری شد.

جدول (۱) مقادیر و نسبت‌های اجزاء مخلوط‌های آزمایش (3 Kg/m)

نام اختلاط	سیمان	میکروسیلیس	درشت‌دانه	ریزدانه	آب آزاد	وزن مخصوص بتن تازه
L1	450	50	315	730	150	1715
L2	450	50	260	860	150	1790
L3	450	50	205	990	150	1865
S1	450	50	595	728	150	1998
S2	450	50	501	858	150	2034
S3	450	50	407	988	150	2070

نسبت‌های اختلاط بتن در ابتدا بر اساس شیوه پیشنهادشده در ACI 211.1 [۲۱] منظور شد. سپس این مقادیر تا رسیدن به مقاومت فشاری مورد نظر بهینه شد. مقادیر و نسبت

جدول (۲) نتایج آزمایش‌های مقاومت فشاری روی نمونه‌های مکعب

۱۵ سانتی‌متری و استوانه استاندارد

نام طرح	مقاومت فشاری مکعب (MPa)	مقاومت فشاری استوانه (MPa)	وزن مخصوص خشک (3Kg/m)	نسبت مقاومت نمونه‌های استوانه به مکعب
L1	۳۳/۲۰	۳۰/۵۴	۱۵۸۵	۰/۹۲
L2	۳۶/۲۹	۳۳/۷۵	۱۶۶۰	۰/۹۳
L3	۴۰/۸۵	۳۸/۴۰	۱۷۳۵	۰/۹۴
S1	۴۵/۳۵	۳۹/۰۰	۱۸۶۸	۰/۸۶
S2	۵۰/۴۶	۴۳/۹۰	۱۹۰۴	۰/۸۷
S3	۵۴/۶۳	۴۸/۶۲	۱۹۴۰	۰/۸۹

بنا به اظهار تولیدکنندگان شرکت لیکا، دانه‌های استفاده شده در این پژوهش کیفیت بهتری دارند.

تأثیر حجم اشغال سبک‌دانه‌ها در بتن نیز به خوبی دیده می‌شود. بافت درشت‌تر یعنی افزایش سبک‌دانه درشت و کاهش ماسه معمولی، دو نتیجه داشته است که کاهش وزن مخصوص بتن و کاهش مقاومت فشاری است؛ زیرا پوکی و تخلخل در بخش سنگ‌دانه بیشتر شده و ضعف بیشتری ایجاد شده است. کاهش مقدار سبک‌دانه با توجه به استفاده از روش طرح مخلوط آمریکایی در بخش تعیین مقدار درشت‌دانه و افزایش مقدار ماسه معمولی به دلیل کاهش شن سبک و به‌کارگیری فرمول حجم مطلق سبب افزایش چشم‌گیر وزن مخصوص بتن می‌شود و مقاومت فشاری بالاتر می‌رود. اما دلیل دیگر را می‌توان در بالا رفتن کیفیت سبک‌دانه درشت دانست. با توجه به نتایج آزمایش‌های مقاومت فشاری به نظر می‌رسد مصرف دوده سیلیسی تأثیر خوبی بر بتن‌های آزمایش شده داشته است. تحلیل گر مدعی است که علت را باید در بهبود منطقه تماس به‌وسیله دوده سیلیسی جست‌وجو کرد. دوده سیلیسی اجازه می‌دهد این ماده بتواند در نزدیکی سبک‌دانه مقادیر قابل توجهی از بلورهای هیدروکسید

کلسیم را جذب کرده و به مصرف رساند و محصولات نفوذناپذیرتر و مقاوم‌تری حاصل شود. وجود رطوبت در سبک‌دانه و مسئله عمل‌آوری داخلی نیز کمک‌کننده است. نکته قابل توجه در نتایج به‌دست‌آمده از مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی و استوانه‌ای، نسبت مقاومت استوانه‌ای به مکعبی است. این مقدار در نمونه‌های حاوی لیکا در محدوده ۰/۹ و حتی بیشتر بوده است. جداشدگی، مقاومت بتن مکعبی را بیش از استوانه‌ای کاهش می‌دهد؛ زیرا تغییر شکل و خردشدگی سریع‌تر یک لایه قائم در نمونه مکعبی در زیر دستگاه فشار سبب کاهش مقاومت بیشتر نمونه مکعبی می‌شود. در حالی که در نمونه استوانه‌ای این منطقه ضعیف افقی بوده و تأثیر کمتری بر کاهش مقاومت دارد. وجود یک لایه پر مقاومت به‌دست‌آمده از مواد پوشش‌دهنده کلاهی که مقاومت بیشتری نسبت به بتن سبک‌دانه دارد، باعث افزایش مقاومت فشاری آزمون استوانه‌ای می‌شود. اثر شرایط انتهایی بر بتن سبک‌دانه کمتر از بتن معمولی است. بنابراین افزایش مقاومت نمونه مکعبی چندان چشم‌گیر نیست. می‌دانیم که در بتن‌های پر مقاومت فشاری، نسبت مقاومت نمونه استوانه‌ای به نمونه مکعبی به عدد یک نزدیک می‌شود. برای بتن‌های سبک‌دانه این پژوهش، نسبت آب به سیمان کم بوده است؛ پس گسیختگی آن به خاطر نزدیکی مدول ارتجاعی سنگ‌دانه و خمیر سیمان، شبیه بتن پر مقاومت است و سنگ‌دانه آن زودتر خرد می‌شود و به عبارتی ترک از بین سنگ‌دانه‌ها عبور می‌کند؛ بنابراین نزدیکی این نسبت به یک منطقی است.

ریلم، معتقد است که در نمونه استوانه‌ای اثر خواص سنگ‌دانه درشت بر مقاومت فشاری کاهش می‌یابد [۲۲]؛ پس در بتن سبک‌دانه، سنگ‌دانه درشت اثر کاهش در

BS8110 و نویل تخمین می‌زند. بهترین تخمین زده شده را می‌توان با گرفتن میانگین از روابط ارائه شده BS8110 و پوپویچ به دست آورد.

جدول (۳) نتایج آزمایش مدول الاستیسیته استاتیکی، ضریب پواسون و مدول برشی بتن

نام طرح	مدول الاستیسیته استاتیکی (GPa)	ضریب پواسون	مدول برشی (GPa)
L1	۱۴/۹۰	۰/۱۹	۶/۲۶
L2	۱۵/۶۷	۰/۱۸	۶/۶۴
L3	۱۸/۵۷	۰/۱۹	۷/۸۰
S1	۱۶/۸۸	۰/۲۰	۵/۷۰
S2	۲۱/۲۷	۰/۲۲	۷/۴۴
S3	۱۹/۳۰	۰/۲۲	۶/۸۹

جدول (۴) برخی از رایج‌ترین روابط برای تخمین مدول الاستیسیته استاتیکی

آئین‌نامه مربوط	روابط معمول برای تخمین مدول الاستیسیته استاتیکی
ACI-363R	$E_s = 3320f_c^{0.5} + 6900$
نویل- [۲۳]	$E_s = (3320f_c^{0.5} + 6900) \left(\frac{\rho}{2320} \right)^{1.5}$
BS-8110 [۲۴]	$E_s = 1.7\rho^2 f_{cu}^{0.33} \times 10^{-6}$
پوپویچ- [۲۵]	$E_s = 1.19f_{cu}^3$

جدول (۵) تخمین‌های زده شده به وسیله روابط رایج (GPa)

نام طرح	پیش‌بینی براساس روابط معتبر (MPa)				مدول الاستیسیته بدست آمده
	ACI-363R	نویل	BS-8110	پوپویچ	
L1	۲۵/۲۵	۱۶/۲۶	۱۵/۸۸	۱۳/۱۷	۱۴/۹۰
L2	۲۶/۱۹	۱۷/۹۸	۱۷/۸۲	۱۴/۰۷	۱۵/۶۷
L3	۲۷/۴۷	۲۰/۰۶	۲۰/۱۱	۱۵/۳۲	۱۸/۵۷
S1	۲۷/۶۳	۲۲/۳۷	۲۳/۸۹	۱۵/۴۷	۱۶/۸۸
S2	۲۸/۹۰	۲۴/۰۳	۲۵/۶۵	۱۶/۷۳	۲۱/۲۷
S3	۳۰/۰۵	۲۵/۶۶	۲۷/۲۷	۱۷/۹۰	۱۹/۳۰

مسلّم است به دلیل وضعیت خاص سبک‌دانه از نوع لیکای تولید ایران، نیاز به ارائه یک مدل خاص برای بتن‌های نیمه‌سبک‌دانه با نسبت آب به سیمان کم و پرعیار و دارای دوده سیلیسی یا بدون آن احساس می‌شود.

مقاومت دارد. این تأثیر در نمونه استوانه‌ای ناچیزتر از نمونه مکعبی می‌شود و مقاومت‌های این دو نوع نمونه به یکدیگر نزدیکتر می‌شود. از سوی دیگر این نسبت در نمونه‌های حاوی اسکوریا اگر چه کمتر از لیکا بوده اما باز هم بیشتر از بتن معمولی است. در این مورد به نظر می‌رسد خصوصیات بتن حاوی اسکوریا به بتن معمولی نزدیک‌تر است.

۲-۳- مدول الاستیسیته استاتیکی

آزمایش مدول الاستیسیته استاتیکی در سن ۲۸ روز روی نمونه‌های استاندارد ۳۰۰×۱۵۰ میلی‌متر و بر اساس مشخصات ASTM انجام شد. در جدول (۳) نتایج آزمایش مدول الاستیسیته استاتیکی ۲۸ روزه همراه وزن مخصوص، ضریب پواسون و مدول برشی بتن مشاهده می‌گردد.

جدول (۴) برخی از رایج‌ترین روابط برای پیش‌بینی مدول الاستیسیته استاتیکی را نشان می‌دهد. در جدول (۵) نتایج مدول الاستیسیته استاتیکی به دست آمده از آزمایشها با تخمین‌های زده شده با روابط رایج مقایسه شده است.

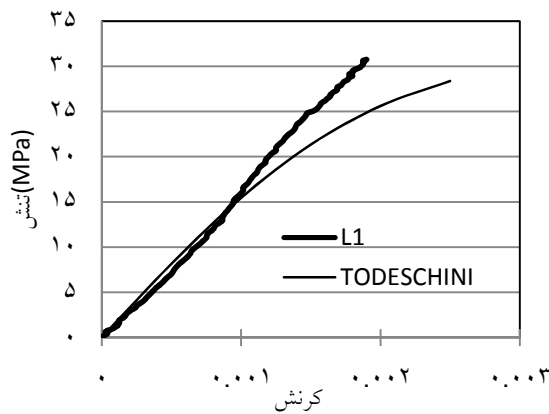
اگر از مدل‌های ریاضی که پارامتر وزن مخصوص دارند برای تخمین مدول الاستیسیته استفاده شود، نتایج متفاوتی به دست می‌آید. اگر رابطه ارائه شده در ACI363 به کار رود نتایج مدول الاستیسیته به دست آمده از آزمایش برای بتن‌های حاوی اسکوریا و لیکا در همه طرح‌ها از نتایج به دست آمده از این مدل ریاضی کوچک‌تر و غیرمنطقی خواهد بود.

رابطه ارائه شده در BS8110 نتایجی را به دست می‌دهد که با وجود بیشتر بودن نتایج تخمین از مقادیر واقعی، اختلاف کم است. نتایج حتی برای نمونه‌های حاوی لیکا بیشتر به واقعیت نزدیک می‌شود. رابطه نویل نیز مقادیری در حد رابطه ارائه شده در BS8110 تخمین می‌زند؛ اما رابطه پوپویچ مقادیری تا حدودی پائین‌تر از روابط ارائه شده در

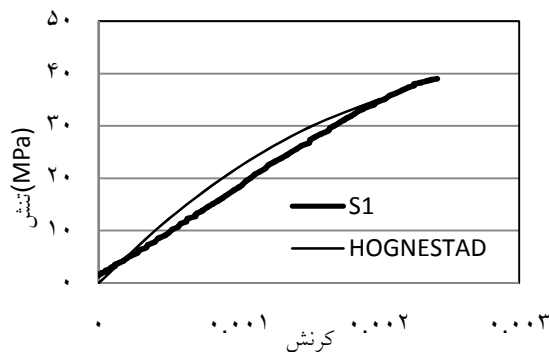
نهایی که برای تعیین مدول الاستیسیته وتری به کار می‌رود را به ۷۵ یا ۸۰ درصد رساند.

۳-۳-۱- مدل‌های ریاضی منحنی تنش - کرنش الف) شاخه صعودی

با توجه به شکل (۳) به نظر می‌رسد بهترین تخمین‌ها برای منحنی مشخصه بتن‌های آزمایش شده را بر مبنای مدول الاستیسیته سکانت بتن‌ها می‌توان زد و رفتار این بتن‌ها بر خلاف بتن‌های معمولی است که معمولاً از نوعی منحنی درجه دوم تبعیت می‌کنند.



شکل (۱) منحنی‌های تنش-کرنش بتن‌های حاوی لیکا (L1)



شکل (۲) منحنی‌های تنش-کرنش بتن‌های حاوی لیکا (S1)

نسبت شیب منحنی درجه یک تخمین زده شده به مدول الاستیسیته سکانت در هر بتن در زیر آمده است.

برای ضریب پواسون پیشنهاد می‌شود مقدار ۰/۱۸ برای بتن‌های حاوی لیکا و ۰/۲۲ برای بتن‌های حاوی اسکوریا منظور شود.

برای این که بتوان با توجه به مقاومت فشاری مقدار مدول الاستیسیته استاتیکی را ساده تر بدست آورد معمولاً مدل‌هایی ارائه می‌شود. مدل‌های ریاضی ساده برای بتن موجود:

$$E_s = 0.478 f_c + 0.13 \quad (R=0.95) \quad (5)$$

$$E_s = 0.255 f_c + 7.942 \quad (R=0.31) \quad (6)$$

$$E_s = 1.15 \times 1.19 \times f_c^{0.66} \quad (R=0.98) \quad (7)$$

روابط ۵، ۶ به ترتیب مربوط به لیکا، اسکوریا و ۷ مربوط به هر دو است. رابطه ۷ ضریب افزایشدهنده ۱/۱۵ را در رابطه پوپویچ اعمال کرده است. سه مدل ارائه شده ضریب همبستگی یکسانی ندارند. در حقیقت رابطه ۷ بهترین تخمین را برای بتن‌های موجود ارائه داده است.

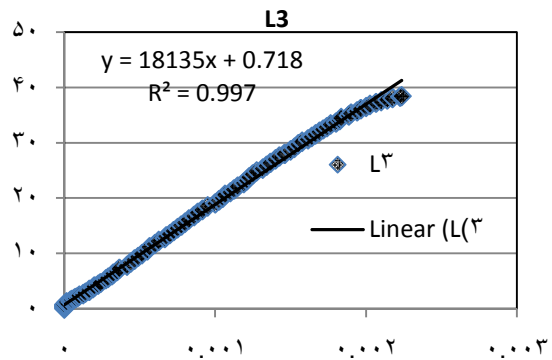
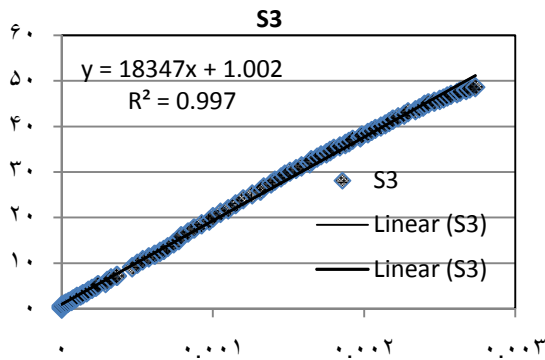
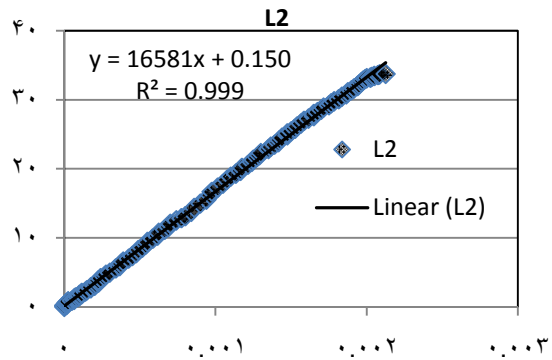
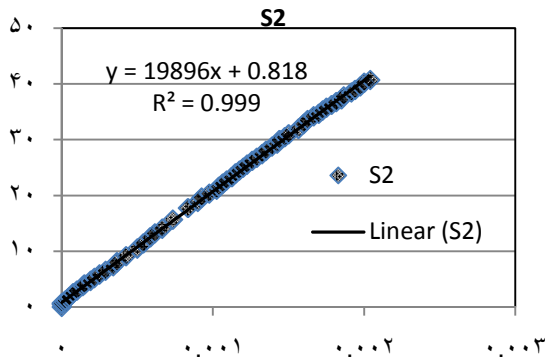
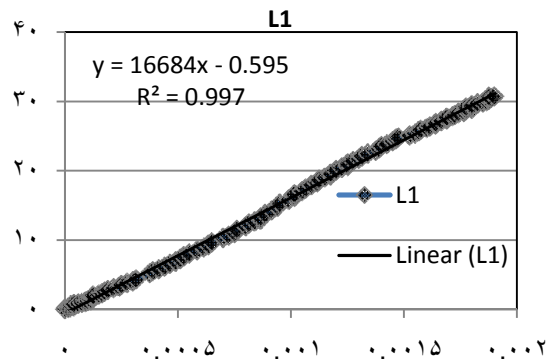
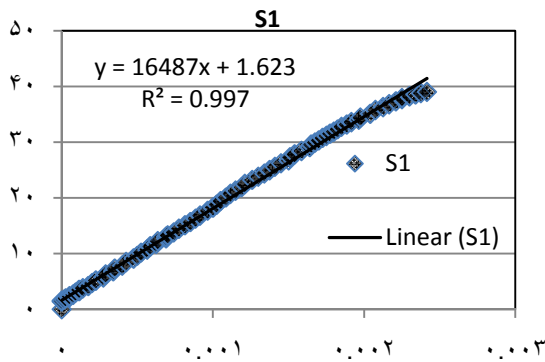
۳-۳-۳- منحنی‌های تنش - کرنش

با استفاده از روابط گفته شده در بخش مقدمه منحنی‌های تنش-کرنش بتن‌ها تخمین زده شد که نزدیک‌ترین تخمین به منحنی‌های واقعی در شکل‌های (۱) و (۲) آورده شده است. کاملاً مشخص است که حتی نزدیک‌ترین تخمین‌ها نیز با منحنی واقعی اختلاف چشم‌گیری دارد؛ به علاوه منحنی‌های واقعی به حالت خطی خیلی نزدیک است. با توجه به روند عمومی رابطه تنش-کرنش در بتن‌های نیمه‌سبک‌دانه و تمام‌سبک‌دانه و خطی بودن آن در بخش عمده‌ای از شاخه صعودی به نظر می‌رسد بتوان قبول کرد که این حالت به خاطر نزدیکی مدول الاستیسیته و رفتار خمیر سیمان و سبک‌دانه لیکا به وجود آمده است. شاید با وجود این حالت بتوان حد ۳۵ یا ۴۰ درصد تنش فشاری

با توجه به ضرایب مشاهده‌شده در جدول (۶) برای لیکا با افزایش مقاومت بتن، شیب منحنی نسبت به مدول الاستیسیته کاهش می‌یابد. در رابطه با اسکوریا در هر سه طرح اختلاط، شیب منحنی کمتر از مدول است که به خاطر بیشتر بودن مدول الاستیسیته دانه‌های اسکوریا نسبت به لیکا است.

جدول (۶) شیب منحنی درجه یک تخمین‌زده‌شده به مدول الاستیسیته سگانت

نسبت شیب منحنی به مدول	نوع طرح
۱/۱۲۰	L1
۱/۰۵۸	L2
۰/۹۷۷	L3
۰/۹۷۷	S1
۰/۹۳۶	S1
۰/۹۵۰	S1

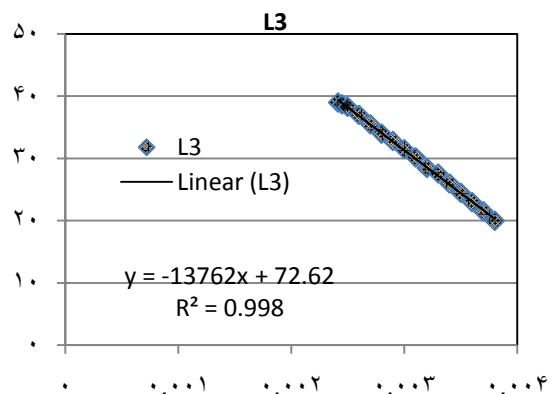
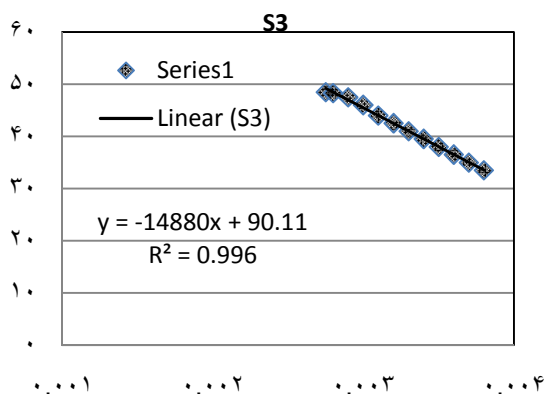
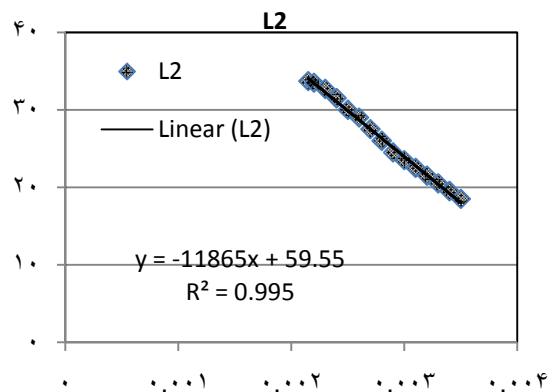
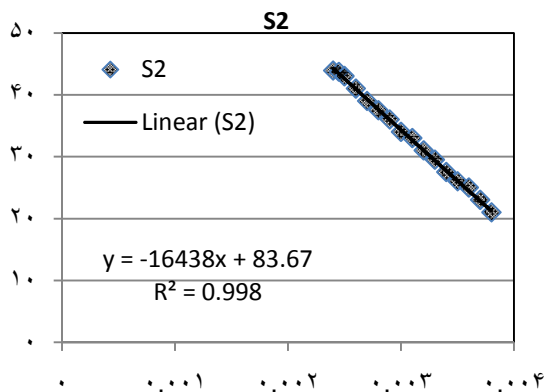
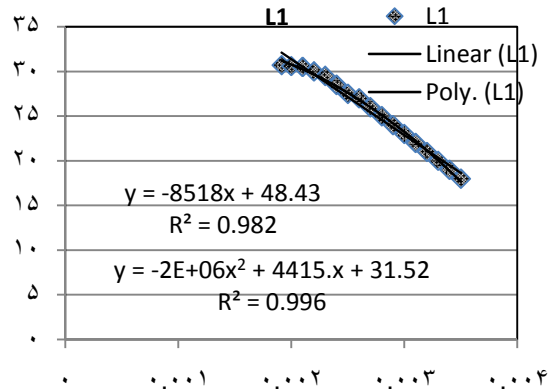
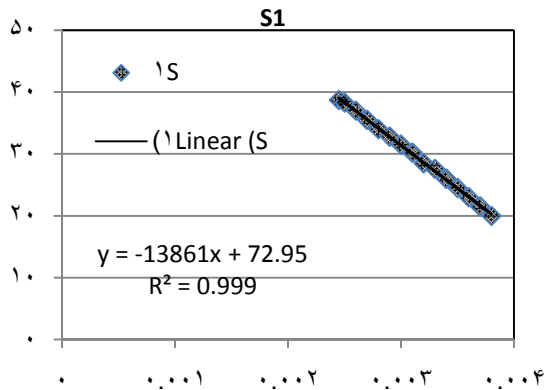


شکل (۳) قسمت صعودی منحنی تنش - کرنش بتن‌های سبک‌دانه

ب) شاخه نزولی

با توجه به شکل (۴) به نظر می‌رسد رابطه مشخصی نمی‌توان برای شاخه نزولی منحنی پیشنهاد داد؛ اما بجز بتن L1 که شاخه نزولی آن با تقریب به شکل منحنی درجه دو همبستگی بهتری نسبت به منحنی خطی دارد،

باقی بتن‌ها با شیب منفی کمتر از شاخه صعودی و به صورت خطی است. کرنش متناظر با بیشینه تنش ثبت شده در منحنی برای بتن‌های حاوی لیکا حدود ۲۰۰۰ میکروکرنش و برای بتن‌های حاوی اسکوریا حدود ۲۵۰۰ میکروکرنش بوده است.



شکل (۴) قسمت نزولی منحنی تنش - کرنش بتن‌های سبک‌دانه

۴- نتیجه‌گیری

با توجه به بررسی‌های آزمایشگاهی و تجزیه و تحلیل‌های انجام‌شده می‌توان نتیجه‌گیری‌های نهایی زیر را مطرح نمود:

- با استفاده از مواد سیمانی با عیار 500 Kg/m^3 و نسبت آب به سیمان $0/30$ ، جایگزینی دوده سیلیسی به میزان 10 درصد وزن سیمان، لیکا با بیشینه اندازه $12/5$ میلی‌متر ($3-10$)، ماسه معمولی، سیمان پرتلند نوع ۱، فوق‌روان‌کننده به میزان 1 درصد وزن مواد سیمانی، بیشترین مقاومت فشاری 28 روزه بین بتن‌های سبک‌دانه، مربوط به مخلوط S3 بوده که برای نمونه مکعبی برابر $54/63 \text{ MPa}$ و برای نمونه استوانه‌ای برابر $48/62 \text{ MPa}$ است. کمترین مقاومت فشاری 28 روزه مربوط به مخلوط L1 است که برای نمونه مکعبی برابر $33/2 \text{ MPa}$ و برای نمونه استوانه‌ای برابر $30/54$ است. کاهش وزن بتن‌های حاوی لیکا حدود 20 درصد بود. نتایج مقاومت‌های فشاری 28 روزه عملاً تابع وزن آزمونه‌ها است و با کاهش آن، مقاومت نیز کاهش می‌یابد.

- مدول الاستیسیته استاتیکی بتن‌های حاوی لیکا با توجه به بافت دانه‌بندی بین حدود 15 تا 19 گیگاپاسکال بود. این مقدار برای بتن‌های حاوی اسکوریا بین 17 تا $19/50$ گیگاپاسکال بود. روابطی نیز برای تخمین مدول الاستیسیته استاتیکی این بتن‌ها بر اساس مقاومت فشاری و وزن مخصوصشان ارائه شده است.

- ضرایب پواسون بتن‌های حاوی لیکا و اسکوریا به طور متوسط $0/19$ و $0/22$ تعیین شد.

- نسبت مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی به استوانه‌ای در بتن‌های حاوی لیکا و اسکوریا کمتر از 1 و در محدوده $0/92$ تا $0/89$ ثبت شد.

- منحنی تنش-کرنش بتن‌های مطالعه‌شده در شاخه‌های صعودی و نزولی، تقریباً منفی بوده است. توصیه‌هایی نیز

برای تخمین این منحنی‌ها ارائه شد.

۵- مراجع

- [1] Topcu I.B., "Semi-lightweight concretes produced by volcanic slags", Cem Concr Res 27(1) (1997) 15-21
- [2] Al-Khaiat H., Haque M.N., "Effect of initial curing on early strength and physical properties of lightweight concrete", Cem Concr Res 28(6) (1998) 859-866
- [3] Ke Y., Beacour A.L., Ortola S., Dumontets H., Cabrillac R., "Influence of volume fraction and characteristics of lightweight aggregates on the mechanical properties of concrete", Cons Build Mat 23 (2009) 2821-2828
- [4] تدین، محسن، "بررسی و ارزیابی مقاومت کششی، مدول ارتجاعی، ضریب پواسون و شدت خوردگی بتن سبک پرمقاومت با مصالح موجود در ایران"، پایان‌نامه دکتری، دانشکده عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، شهریور ۱۳۸۱.
- [5] Demirboga R., Orung I., Gul R., "Effects of expanded perlite aggregate and mineral admixtures on the compressive strength of low-density concretes". Cement Concrete Res. 31(11) (2001) 1627-1632
- [6] Chen H.J., Yen T., Lia T.P., Huang Y.L., "Determination of dividing strength and it's relation to the concrete strength in lightweight aggregate concrete", Cement and Concrete Composition, Vol. 21, (1999) 29-37
- [7] European Union-Brite Euram III, "Definitions and international consensus report, BE96-3942/R1", 1998
- [8] Zhang M.H., Gjorv O.E., "Characteristics of lightweight aggregates for high-strength concrete", ACI Mater. J., 1991(March-April) 150-158
- [9] Yang C.C., Huang R., "Approximate strength of lightweight aggregate using micromechanics

- concrete", American Society For Testing And Materials, December 1999
- [21] ACI 211.2-98, "Standard practice for selecting proportions for structural lightweight concrete", American Concrete Institute, 1998
- [۲۲] فامیلی، هرمز، "خواص بتن"، ابوریحان بیرونی، چاپ اول، ۱۳۷۸
- [23] Neville A.M., "Properties of concrete", Longman, 3rd Edition, 1981
- [24] Slate F.O., Nilson A.H., Martinez S., "Mechanical properties of high strength lightweight concrete", ACI Materials Journal, Vol.3, (1986) 606-613
- [25] Popovics S., "Strength and related properties of concrete, a quantitative approach", JohnWiley, 1998
- method", Adv. Cem. Based Mater., 7(3-4) (1998) 133-138
- [10] Wasserman R., Bentur A., "Effect of lightweight fly ash aggregate microstructure on the strength of concretes", Cem. Concr. Res., 27(4) (1997) 525-537
- [11] Kilic A., Atis C.D., Yasar E., Ozcan F., "High-strength lightweight concrete made with scoria aggregate containing mineral admixtures", Cem Concr Res, 33 (2003) 1595-1599
- [12] Macgregor J.G., "Reinforced concrete mechanics and design", Prentice Hall, 3rd Edition, 1997
- [13] Hognestad E., "A study of combined bending and axial load in reinforced concrete members", Bulletin 399, University of Illinois Engineering Experiment Station, Urbana, Ill., November 1951, 128
- [14] Todeschini C.E., Bianchini A.C., and Clyde E. Kesler, "Behavior of concrete columns reinforced with high strength steels", ACI Journal, Proceedings. Vol. 61, No. 6, June 1964, 701-716
- [15] Popovics S., "A numerical approach to the complete stress-strain curve of concrete", Cement and Concrete Research, Vol. 3, (1973) 583-599
- [16] Yi S.T., Kim J.K., Oh T.K., "Effect of strength and age on the stress-strain curves of concrete specimens", Cement and Concrete Research, Vol. 33, (2003) 1235-1244
- [17] Blechman I., "Stage model of stress-strain relationship for concrete under short-term load – Part.1", Cement and Concrete Research, Vol. 18, (1988) 863-873
- [18] ASTM C330-99, "Standard specification for lightweight aggregates for structural concrete", American Society for Testing And Materials, March 1999
- [19] ASTM C150-99a, "Standard specification for portland cement", American Society For Testing And Materials, November 1999
- [20] ASTM C 494/C 494M – 99a, "Standard specification for chemical admixtures for