

ساخت بتن سبکدانه پرمقاومت حاوی اسکوریا^۱ و لیکا^۲

مصطفی خانزادی*، علی رضا چاله کایی[§]، رسول احمدی[¶]

* استادیار، دانشکده عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

[§] کارشناس ارشد، دانشکده عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

[¶] استادیار، پژوهشکده ساختمان و مسکن، تهران، ایران

پست الکترونیکی: a.chalekaee@gmail.com

چکیده:

در این تحقیق امکان استفاده از سنگدانه‌های اسکوریا و لیکا موجود در کشور به منظور تولید بتن سبکدانه پرمقاومت بررسی شده است. بر اساس طرح‌های اختلاط مختلف و استفاده از روش‌های مرسوم، تولید بتن سبکدانه‌ای با مقاومت فشاری بیشتر از ۴۰ مگاپاسکال که بتوان آنرا در بتن مسلح و پیش‌تنیده بکار برد، ممکن شد.

به منظور بررسی مشخصات مکانیکی کوتاه مدت این نوع بتن پرمقاومت آزمایش‌های مختلفی چون وزن مخصوص بتن، مقاومت فشاری، مقاومت کششی (شکافت)، مدول الاستیسیته استاتیکی و ضریب پواسون انجام شد. مشخص گردید که با افزایش وزن بتن به وسیله تغییر در بافت دانه بندی، مقاومت فشاری، کششی (شکافت) و مدول الاستیسیته بتن‌های مورد آزمایش افزایش یافته است. استفاده از دوده سیلیسی نیز در بهبود مقاومت فشاری و کششی (شکافت) این بتن‌ها مؤثر بوده است. با مقایسه برخی از رایجترین روابط ارائه شده در آئین‌نامه‌های موجود به منظور تخمین مقاومت کششی (شکافت) و مدول الاستیسیته، انطباق نتایج ثبت شده در آزمایش‌ها با روابط ذکر شده بررسی گردید.

واژه‌های کلیدی:

بتن سبکدانه، لیکا، اسکوریا، مقاومت فشاری، مدول الاستیسیته، مقاومت کششی (شکافت)

¹ Scoria

² Leca



۱- مقدمه:

امروزه، تولید بتن سبکدانه گسترده شده و نیاز به مصالح سبک مقرون به صرفه با مشخصات مکانیکی ممتاز در صنعت ساخت افزایش یافته است. واژه بتن سبکدانه در مورد انواع مختلف بتن، از بتن‌های غیر سازه‌ای که در تهیه قطعات جداکننده کاربرد دارند تا بتن‌های پرمقاومت با مقاومت فشاری ۱۰۰ مگاپاسکال به کار برده می‌شود. محققین بسیاری [۲] و [۱] در تحقیقاتشان نسبت بالای مقاومت به وزن، مقاومت کششی قابل قبول، ضریب انبساط حرارتی پائین، و خواص برتر در بتن‌های سبکدانه را گزارش کرده‌اند. به علاوه با سبکتر شدن بتن، از سطح مقطع اعضای سازه‌ای کاسته شده و هزینه‌های ساخت اقتصادی‌تر می‌شود.

تولید هر نوع بتن سبکدانه کاملاً به در دسترس بودن سبکدانه مربوطه مرتبط است. محققین بسیاری [۳] استفاده از سبکدانه‌هایی با وزن مخصوص متفاوت شامل سبکدانه‌های طبیعی چون توف و پرلیت یا سبکدانه‌های صنعتی چون رس منبسط شده یا شیل در بتن سبکدانه را بررسی نموده‌اند. این محققین به نتیجه رسیده‌اند که استفاده از افزودنی‌های معدنی چون خاکستر بادی، دوده سیلیسی و پوزولان‌های طبیعی در تولید این بتن‌ها به دلیل خواص پوزولانی آنها منجر به بهبود خواص مکانیکی بتن می‌شود. عموماً مقاومت بتن سبکدانه سازه‌ای در شرایط عادی ۲۱ تا ۲۸ مگاپاسکال می‌باشد [۴]. که میتوان آن را با کاهش نسبت آب به سیمان، افزایش عیار سیمان، کم کردن حداکثر اندازه، جایگزینی ماسه معمولی به جای سبکدانه ریز، مصرف دوده سیلیسی جایگزین سیمان و بکارگیری فوق روان کننده افزایش داد.

ضعیف‌ترین جزء بتن سبک سنگدانه آن می‌باشد، نه ماتریس سیمان یا ناحیه انتقالی^۳. به همین دلیل، عملکرد مکانیکی بتن سبک تنها بوسیله کیفیت ماتریس سیمان آن کنترل نمی‌شود بلکه حجم سبکدانه در بتن و نیز مشخصات سنگدانه نیز بسیار با اهمیت است [۵]. ژانگ و جورو^۴ تاثیر چگالی بتن سبک بر مقاومت مکانیکی و مکانیسم گسیختگی بتن سبکدانه پرمقاومت را بررسی کرده‌اند [۶]. یانگ و هوانگ^۵ نیز اهمیت درصد حجمی سبکدانه بر مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته بتن سبک را مشخص نموده‌اند [۷]. عموماً، کیفیت سبکدانه تنها با چگالی آن سنجیده می‌شود، چرا که سنجش مشخصات مکانیکی سبکدانه مشکل است. به هر حال، واسرمن و بنتور^۶ نشان داده‌اند که سبکدانه‌هایی با چگالی یکسان عموماً منجر به مقاومت فشاری یکسان در بتن نمی‌شوند [۸].

اسکوربای بازالتی^۷ که تحت عنوان اسکوریا شناخته می‌شود، نوعی سنگ آذرین است. این سنگ تیره رنگ، دارای ساختار متخلخل، ظاهر گوشه دار و سطح زبر می‌باشد. اسکوریا در صنعت ساخت به عنوان آجر، بلوک‌های جداکننده و عایق به کار برده شده است، اما تا کنون به صورت صنعتی در بتن سازه‌ای استفاده نشده است و تحقیقات کمی در رابطه با استفاده از آن در بتن پرمقاومت سبکدانه ارائه شده است.

سبکدانه رس منبسط شده سبک که عموماً از آن با نام لیکا نام برده می‌شود، نوع خاصی از رس است که در کوره دوار و در دمای بسیار زیاد تحت حرارت قرار گرفته است. در کوره در حالی که سطح خارجی هر گلوله متراکم می‌گردد، اجزای آلی موجود در

³ interfacial transition zone

⁴ Zhang & Gjorv

⁵ Yang & Huang

⁶ Wasserman & Bentur

⁷ Basaltic Scoria



رس به شکل گلوله‌های لانه زنبوری منبسط می‌شود. در نتیجه دانه‌های حاصله سبک، متخلخل و با پوسته‌ای نفوذ ناپذیر می‌باشد. عموماً، لیکای ایران جزو لیکاهای سبک تلقی می‌شود. پروژه‌های تحقیقاتی متعددی سعی در تعیین مقاومت فشاری بتن سبکدانه حاوی لیکا در شرایط مختلف نموده‌اند [۳].

هدف از این تحقیق، در مرحله اول امکان استفاده از لیکا و اسکوریای موجود در کشور به منظور تولید بتن سبکدانه پرمقاومت با افزودن دوده سیلیسی و فوق‌روان‌کننده، و در مرحله بعد بررسی برخی از مشخصات مکانیکی کوتاه مدت این بتن‌ها شامل مقاومت فشاری، مقاومت کششی (شکافت) و مدول الاستیسیته استاتیکی می‌باشد.

۲- اطلاعات آزمایشگاهی

۲-۱- مصالح مصرفی

برای ساخت نمونه‌ها، سیمان نوع I، دوده سیلیسی تولید شده در شرکت صنایع فروآلیاژ ایران واقع در ازنآ، لیکای درشت دانه ایرانی و اسکوریای استخراج شده از قروه با حداکثر اندازه ۱۲/۵ میلی‌متر به عنوان درشت دانه، ریزدانه معمولی تولیدی شرکت متوساک و همچنین افزودنی فوق‌روان‌کننده بر پایه نفتالین محصول شرکت ب. آ. اس. اف ایرانیان به کار برده شد. در تمامی نمونه‌ها از ریزدانه خشک معمولی و درشت دانه سبک خشک استفاده شده است. در جدول ۱ دانه بندی وزنی لیکا و اسکوریا طبق محدوده استاندارد ASTM C330 [۹] و ریزدانه معمولی طبق محدوده استاندارد ASTM C33 [۱۰] ارائه شده است. وزن مخصوص فضایی خشک انبوهی (Kg/m^3) برای لیکا و اسکوریا به ترتیب ۴۳۰ و ۷۰۲ و وزن مخصوص فضایی خشک متراکم با میله (Kg/m^3) لیکا و اسکوریا نیز ۵۰۷ و ۷۸۳ می‌باشد. حداکثر میزان وزن مخصوص فضایی خشک انبوهی برای درشت دانه‌های سبک طبق استاندارد ASTM C330، 880 Kg/m^3 قید شده است. جذب آب ۲۴ ساعته دانه‌های لیکا و اسکوریا نیز به ترتیب ۸ و ۵ درصد می‌باشد.

جدول ۱- دانه بندی وزنی (درصد رد شده) سبکدانه‌های لیکا و اسکوریا طبق محدوده استاندارد ASTM C330 و

ریزدانه طبق محدوده استاندارد ASTM C33

اندازه الک (mm)	لیکا	اسکوریا	محدوده استاندارد سبکدانه‌ها	ریز دانه	محدوده استاندارد ریزدانه
۱۲/۵	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	-	-
۹/۵	۸۵/۵	۸۶/۷	۸۰-۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰
۴/۷۵	۳۷/۱	۲۰/۴	۵-۴۰	۹۹/۵	۹۵-۱۰۰
۲/۳۶	۱۴/۳	۱/۴	۰-۲۰	۹۷/۷	۸۰-۱۰۰
۱/۱۹	۴/۵	۱/۲	۰-۱۰	۶۶/۲	۵۰-۸۵
۰/۶	-	-	-	۴۱/۴	۲۵-۶۰
۰/۳	-	-	-	۲۲/۹	۵-۳۰
۰/۱۵	-	-	-	۱۲/۲	۰-۱۰



۲-۲- اصول انتخاب مخلوط‌ها و نسبت‌های آن‌ها

شش مخلوط مختلف جهت مقایسه حجم سبکدانه‌ها بر مشخصات فیزیکی بتن تهیه شد. در هر طرح‌ها، حروف L و S در عنوان هر طرح اختلاط به ترتیب بیانگر بتن حاوی لیکا و اسکوریا می‌باشد. تمام مخلوط‌های بتن با ۵۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب مواد سیمانی و نسبت وزنی سیمان به مواد سیمانی ۰/۳ طرح گردید. در این طرح‌ها ۴۵۰ کیلوگرم سیمان پرتلند نوع I به همراه ۵۰ کیلوگرم دوده سیلیسی بکار برده شد. از تمامی مخلوط‌ها آزمایش افت اسلامپ گرفته شد و میزان افت اسلامپ در تمامی اختلاط‌ها ۱۰-۸ سانتیمتر بوده است. به منظور دستیابی کارایی مورد نظر فوق‌روان‌کننده‌ای به میزان یک درصد وزن سیمان به بتن‌ها اضافه گردید.

از هر اختلاط، نمونه‌های مکعب ۱۵۰ میلیمتری، سیلندر استاندارد و سیلندر با طول ۲۰۰ و قطر ۱۰۰ میلیمتر به منظور تعیین مقاومت فشاری، مدول الاستیسیته و مقاومت کششی (شکافت) در سن ۲۸ روز تهیه گردید. تمامی نمونه‌ها در دو لایه بر روی میز ویبره متراکم گردید. سطح تمامی نمونه‌ها پس از متراکم شدن تراز گردید، با ماله پرداخت شد و در قالب به مدت یک روز نگهداری شد. سپس قالب‌ها باز شد و نمونه‌ها تا زمان انجام آزمایش در حوضچه آب با دمای 23 ± 2 درجه سانتیگراد عمل‌آوری گردید.

۲-۳- روش تعیین نسبت‌های اختلاط

برای تعیین نسبت‌های اختلاط با توجه به اصول انتخاب مخلوط‌ها و فرضیات و اطلاعات موجود و با استفاده از روش حجم مطلق، مقادیر اجزاء بتن بدست آمد. نسبت‌های اختلاط بتن در ابتدا بر اساس شیوه پیشنهاد شده در ACI 211.1 [۱۱] در نظر گرفته شد. سپس، این مقادیر تا رسیدن به مقاومت فشاری مورد نظر بهینه گردید. برای این کار ابتدا نسبت آب به سیمان منظور می‌شود و سپس مقدار آب با توجه به عیار مواد سیمانی مشخص می‌گردد. هم‌چنین حدود فوق‌روان‌کننده برای دستیابی به روانی مورد نظر با توجه به تجربیات قبلی تعیین می‌شود. به کمک دانه‌بندی سنگدانه ریز و با استفاده از جدول حجم سنگدانه درشت متراکم با میله مندرج در ACI 211.1 و ACI 211.2 [۱۲] و وزن مخصوص شن متراکم با میله، وزن شن خشک بدست می‌آید. برای تغییر بافت دانه‌بندی ۱۰ درصد این مقدار بر حسب چگالی دانه‌ای سنگدانه‌ها کم یا زیاد می‌شود تا حجم بتن ثابت بماند. با توجه به جذب آب سنگدانه در مرحله نزدیک به گیرش بتن، وزن شن اشباع یا نیمه اشباع مشخص می‌شود. در مرحله بعد با توجه به درصد هوای مفروض و استفاده از فرمول حجم مطلق، وزن سنگدانه ریز اشباع یا نیمه اشباع بدست می‌آید و با عنایت به جذب آب سنگدانه ریز در این شرایط، وزن سنگدانه ریز تعیین می‌شود. مسلماً با توجه به مقادیر حاصله وزن یک متر مکعب بتن تازه متراکم بدست می‌آید. مقادیر و نسبت مخلوط‌های بتن در جدول ۲ ملاحظه می‌شود.

جدول ۲- مقادیر و نسبت‌های اجزاء مخلوط‌های آزمایش (kg/m^3)

نام اختلاط	سیمان	میکروسیلیس	درشت دانه	ریزدانه	آب	وزن مخصوص بتن تازه
L1	۴۵۰	۵۰	۳۱۵	۷۳۰	۱۵۰	۱۷۱۵
L2	۴۵۰	۵۰	۲۶۰	۸۶۰	۱۵۰	۱۷۹۰
L3	۴۵۰	۵۰	۲۰۵	۹۹۰	۱۵۰	۱۸۶۵



۱۹۹۸	۱۵۰	۷۲۸	۵۹۵	۵۰	۴۵۰	S1
۲۰۳۴	۱۵۰	۸۵۸	۵۰۱	۵۰	۴۵۰	S2
۲۰۷۰	۱۵۰	۹۸۸	۴۰۷	۵۰	۴۵۰	S3

۳- نتایج و تفسیر آنها

۳-۱- نتایج آزمایش مقاومت فشاری

نتایج آزمایش‌های مقاومت فشاری بر روی نمونه‌های ۲۸ روزه مکعب ۱۵ سانتیمتری و استوانه استاندارد و نیز وزن مخصوص خشک نمونه‌ها در جدول ۳ و نمودار ۱ ارائه شده است. با بکارگیری توصیه‌های پیشنهاد شده در آئین‌نامه‌ها، بیشترین مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن‌های حاوی لیکا، طرح L3 می‌باشد، که در نمونه استوانه‌ای $38/4 \text{ MPa}$ و نمونه مکعبی $40/85 \text{ MPa}$ حاصل شده است. در این حالت وزن مخصوص بتن خشک 1735 kg/m^3 بدست آمده است. بیشترین مقاومت فشاری ۲۸ روزه در بین بتن‌های حاوی اسکوریا مربوط به مخلوط S3 است که برای نمونه مکعبی برابر $54/63 \text{ MPa}$ و برای نمونه استوانه‌ای معادل $48/62 \text{ MPa}$ است. وزن مخصوص بتن خشک شده مربوط به این طرح حدود 1940 kg/m^3 بدست 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 نیز برای بتن‌های حاوی لیکا در حدود $0/93$ و برای نمونه‌های حاوی اسکوریا در حدود $0/87$ ثبت شده است.

جدول ۳- نتایج آزمایش‌های مقاومت فشاری بر روی نمونه‌های مکعب ۱۵ سانتیمتری و استوانه استاندارد

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



نمودار ۱- نتایج آزمایش‌های مقاومت فشاری بر روی نمونه‌های مکعب ۱۵ سانتیمتری و استوانه استاندارد

۳-۱-۱- تجزیه و تحلیل آزمایش‌های مقاومت فشاری

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 تحقیق نسبت به تحقیقات گذشته در ایران به دلیل تفاوت نوع دانه‌ها در مقایسه با لیکاهای استفاده شده در آن تحقیقات می‌باشد. بنا به اظهار تولیدکنندگان شرکت لیکا، دانه‌های استفاده شده در تحقیق حاضر کیفیت مطلوبتری را دارا می‌باشند.

تأثیر حجم اشغال سبکدانه‌ها در بتن نیز به خوبی مشهود است. بافت درشت‌تر یعنی افزایش سبکدانه درشت و کاهش ماسه معمولی دو نتیجه را در بر داشته است که کاهش وزن مخصوص بتن و کاهش مقاومت فشاری می‌باشد. دلیل این امر نیز روشن است زیرا پوکی و تخلخل در بخش سنگدانه بیشتر شده و ضعف بیشتری عارض گشته 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 بکارگیری فرمول حجم مطلق باعث 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 را در مورد بتن‌های مورد آزمایش بر جای نهاده است. تحلیل گر مدعی است که علت این امر را باید در بهبود منطقه تماس توسط دوده سیلیسی جستجو



کرد. دوده سیلیسی اجازه می‌دهد تا این ماده بتواند در نزدیکی سبکدانه مقادیر قابل توجهی از بلورهای هیدروکسید کلسیم را جذب کند و به مصرف رساند و محصولات نفوذ ناپذیرتر و مقاوم‌تری حاصل گردد. وجود رطوبت در سبکدانه و مسئله عمل‌آوری داخلی به این امر کمک می‌کند.

نکته قابل توجه در نتایج حاصله از مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی و استوانه‌ای، نسبت مقاومت استوانه‌ای به مکعبی می‌باشد. 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 باعث کاهش مقاومت بیشتر مقاومت 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 حاصله از مواد پوشش‌دهنده کلاهدک که مقاومت بیشتری نسبت به بتن سبکدانه دارد، باعث افزایش مقاومت فشاری آزمونه استوانه‌ای می‌گردد.

اثر شرایط انتهایی بر بتن سبکدانه کمتر از بتن معمولی است لذا 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. بتن‌های سبکدانه این تحقیق با نسبت آب به سیمان کم بوده است و لذا گسیختگی آن به واسطه نزدیکی مدول ارتجاعی سنگدانه و خمیر سیمان شبیه به بتن پر مقاومت است و سنگدانه آن زودتر خرد می‌شود و به عبارتی ترک از بین سنگدانه‌ها عبور می‌کند. بنابراین این نزدیکی این نسبت به یک منطقی می‌باشد.

ریلم^۸ معتقد است که در نمونه استوانه‌ای اثر خواص سنگدانه درشت بر مقاومت فشاری کاهش می‌یابد [۱۳] لذا در بتن سبکدانه که سنگدانه درشت اثر کاهش در مقاومت داشت، این تأثیر در نمونه استوانه‌ای ناچیزتر از نمونه مکعبی می‌گردد 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 می‌باشد. در این مورد به نظر می‌رسد خصوصیات بتن حاوی اسکوریا به بتن معمولی نزدیکتر می‌باشد.

۲-۲- نتایج آزمایش مقاومت کششی (شکافت)

نتایج آزمایش‌های مقاومت کششی (شکافت) ۲۸ روزه آزمونه‌های استوانه‌ای در جدول ۴ و نمودار ۲ مشاهده می‌شود. مقاومت کششی بتن‌های حاوی اسکوریا دارای بیشترین مقادیر هستند و با افزایش وزن آزمونه‌ها افزایش مقاومت کششی مشاهده می‌شود.



جدول ۴- نتایج آزمایش‌های مقاومت کششی (شکافت) بر روی نمونه‌های استوانه‌ای

نام طرح	مقاومت کششی (MPa)	نام طرح	مقاومت کششی (MPa)
L1	۳/۱۸	S1	۴/۶۱
L2	۳/۶۵	S2	۴/۷۲
L3	۴/۵۲	S3	۴/۷۸



نمودار ۲- نتایج مقاومت فشاری استوانه در مقابل مقاومت کششی (MPa)

جدول ۵ برخی از رایجترین روابط معمول جهت پیش‌بینی مقاومت کششی (شکافت) را نشان می‌دهد. در جدول ۶ نتایج مقاومت کششی (شکافت) حاصل از آزمایشات با پیش‌بینی‌های صورت گرفته توسط روابط رایج ارائه شده در جدول ۵ مقایسه شده است.

جدول ۵- برخی از رایجترین روابط معمول جهت پیش‌بینی مقاومت کششی (شکافت)

روابط معمول جهت پیش‌بینی مقاومت کششی (شکافت)	آئین نامه مربوط
$f_{sp} = 0.47 f_c^{0.5}$	[۱۴] ACI318 LWC
$f_{sp} = 0.53 f_c^{0.5}$	ACI318 NWC
$f_{sp} = 0.62 f_c^{0.5}$	[۱۵] ACI363 NWC
$f_{sp} = 0.59 f_c^{0.5}$	ACI363 HSC



$f_{ct} = 0.23f_{cu}^{0.67}$	[۱۶] FIP
$f_{ct} = 0.3f_{cu}^{0.67}$	[۱۷] ENV1992-1

جدول ۶- پیش‌بینی‌های صورت‌گرفته مقاومت کششی (شکافت) توسط روابط رایج (MPa)

پیش‌بینی صورت‌گرفته بر اساس روابط معتبر (MPa)						مقاومت کششی اندازه‌گیری شده	نام طرح
ACI318 LWC	ACI318 NWC	ACI363 NWC	ACI363 HSC	FIP	ENV1992-1		
۲/۶۰	۲/۹۳	۳/۴۳	۳/۲۶	۲/۴۰	۲/۶۱	۳/۱۸	L1
۲/۷۳	۳/۰۸	۳/۶۰	۳/۴۳	۲/۵۵	۲/۸۴	۳/۶۵	L2
۲/۹۱	۳/۲۸	۳/۸۴	۳/۶۶	۲/۷۶	۳/۱۵	۴/۵۲	L3
۲/۹۴	۳/۳۱	۳/۸۷	۳/۶۸	۲/۹۶	۳/۵۱	۴/۶۱	S1
۳/۱۱	۳/۵۱	۴/۱۱	۳/۹۱	۳/۱۸	۳/۸۲	۴/۷۲	S2
۳/۲۸	۳/۷۰	۴/۳۲	۴/۱۱	۳/۳۶	۴/۰۷	۴/۷۸	S3

۳-۲-۱- تجزیه و تحلیل مقاومت کششی

با توجه به پیش‌بینی‌های صورت‌گرفته نتایج مقاومت کششی برای تمامی بتن‌های آزمایش شده چشمگیرتر از بتن معمولی است. دلیل این امر را باید در بهبود منطقه تماس و استفاده از دوده سیلیسی دانست و عامل دیگری دخیل نیست. با رجوع به پیش‌بینی‌های صورت‌گرفته و مقایسه نتایج با فرمولی که برای بتن‌های سبک‌دانه از سوی ACI پیشنهاد شده، نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که از ۲۲٪ تا ۵۷٪، نتایج بدست آمده بیشتر از فرمول ذکر شده می‌باشد و این به دلیل اهمیت منطقه تماس در کشش و استفاده از دوده سیلیسی در تمامی بتن‌ها می‌باشد. با توجه به تخمین‌های حاصل از روابط ارائه شده در ACI363 که برای بتن‌های پر مقاومت تر پیشنهاد شده است و نزدیک بودن این مقادیر به نتایج مقاومت کششی بتن‌ها بهبود منطقه تماس از این طریق نیز اثبات می‌شود. توجه به این مطلب نیز ضروریست که نتایج نمونه‌های حاوی اسکوریا نسبت به لیکا کاملاً بالاتر ثبت شده است. هرچند در نگرش ریز، ماهیت خرابی و گسیختگی، کششی است، با این حال ماهیت مقاومت کششی با مقاومت فشاری متفاوت می‌باشد. اگر نمونه‌های بتن با یک نسبت آب به سیمان در آزمایش فشار و کشش رفتار یکسانی را به نمایش نگذارند باید به منطقه تماس و نقش آن توجه کرد. مقاومت فشاری بتن سبک‌دانه با افزایش اندازه سنگدانه درشت (حداکثر اندازه) کاهش می‌یابد و این اثر به ساختار منطقه تماس نسبت داده شد. باید گفت به نظر می‌رسد این تأثیر برای مقاومت کششی باید بیشتر و جدی‌تر باشد و این موضوع در این جا به اثبات می‌رسد. در مقاومت کششی معمولاً نقش مقاومتی سنگدانه کمتر است و مقاومت کششی خمیر سیمان و کیفیت منطقه تماس مهمتر است.

۳-۳- نتایج آزمایش مدول الاستیسیته استاتیکی

در جدول ۷ و نمودار ۳ نتایج آزمایش مدول الاستیسیته استاتیکی ۲۸ روزه به همراه وزن مخصوص، ضریب پواسون و مدول برشی



بتن مشاهده می‌گردد.

جدول ۷- نتایج آزمایش مدول الاستیسیته استاتیکی، ضریب پواسون و مدول برشی بتن

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



نمودار ۳- نتایج آزمایش مدول الاستیسیته استاتیکی

جدول ۸ برخی از رایجترین روابط معمول جهت پیش بینی مدول الاستیسیته استاتیکی را نشان می‌دهد. در جدول ۹ نیز نتایج مدول الاستیسیته استاتیکی حاصل از آزمایشات با تخمین‌های صورت گرفته توسط روابط رایج ارائه شده در جدول ۸ مقایسه شده است.

جدول ۸ - برخی از رایجترین روابط معمول جهت تخمین مدول الاستیسیته استاتیکی

روابط معمول جهت تخمین مدول الاستیسیته استاتیکی	آئین نامه مربوط
$E_s = 3320f_c^{0.5} + 6900$	ACI-363R



$E_s = (3320 f_c^{0.5} + 6900) \left(\frac{\rho}{2320} \right)^{1.5}$	نویل ^۹ - [۱۸]
$E_s = 1.7 \rho^2 f_{cu}^{0.33} \times 10^{-6}$	[۱۹] BS-8110
$E_s = 1.19 f_{cu}^{\frac{2}{3}}$	پوپوویچ ^{۱۰} - [۲۰]

جدول ۹- تخمین‌های صورت گرفته توسط روابط رایج (GPa)

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

۳-۳-۱- تجزیه و تحلیل خواص الاستیک

اگر از مدل‌های ریاضی که دارای پارامتر وزن مخصوص هستند جهت تخمین مدول الاستیسیته استفاده شود، نتایج متفاوتی حاصل می‌گردد. اگر رابطه ارائه شده در ACI363 بکار رود نتایج مدول الاستیسیته بدست آمده از آزمایش برای بتن‌های حاوی اسکوریا و لیکا در تمامی طرح‌ها از نتایج حاصله از این مدل ریاضی کوچکتر و غیر منطقی است. رابطه ارائه شده در BS8110 نتایجی را ارائه می‌دهد که با وجود بیشتر بودن نتایج تخمین از مقادیر واقعی، اما اختلاف موجود پائین 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 پوپوویچ مقادیری تا حدودی پائین‌تر از روابط ارائه شده در BS8110 و نویل تخمین می‌زند. بهترین تخمین صورت گرفته را می‌توان با گرفتن میانگین از روابط ارائه شده در BS8110 و پوپوویچ بدست آورد.

مسلم است به دلیل وضعیت خاص سبکدانه از نوع لیکای تولید ایران، نیاز به ارائه یک مدل خاص برای بتن‌های نیمه سبکدانه با نسبت آب به سیمان کم و پرعیار و دارای دوده سیلیسی یا بدون آن احساس می‌گردد. برای ضریب پواسون پیشنهاد می‌گردد مقدار ۰/۱۸ برای بتن‌های حاوی لیکا و ۰/۲۲ برای بتن‌های حاوی اسکوریا منظور گردد.

⁹ Nevil

¹⁰ Popovics



۴- نتیجه گیری

- با توجه به بررسی‌های آزمایشگاهی و تجزیه و تحلیل‌های انجام شده، می‌توان نتیجه‌گیری‌های نهایی زیر را مطرح نمود:
- ۱- با کاربرد مواد سیمانی با عیار 500 Kg/m^3 و نسبت آب به سیمان $0/30$ ، جایگزینی دوده سیلیسی به میزان 10% وزن سیمان، لیکا با حداکثر اندازه $12/5$ میلی‌متر ($10-3$)، ماسه معمولی، سیمان پرتلند نوع ۱، فوق‌روان‌کننده به میزان 1% وزن مواد سیمانی، بیشترین مقاومت فشاری 28 روزه در بین بتن‌های سبک‌دانه مربوط به مخلوط S3 بوده، که برای نمونه مکعبی برابر $54/63 \text{ Mpa}$ و برای نمونه استوانه‌ای معادل $48/62 \text{ Mpa}$ است. کمترین مقاومت فشاری 28 روزه مربوط به مخلوط L1 است که برای نمونه مکعبی برابر $33/2 \text{ Mpa}$ و برای نمونه استوانه‌ای معادل $30/54 \text{ Mpa}$ می‌باشد. کاهش وزن بتن‌های حاوی لیکا در حدود 30% و بتن‌های حاوی اسکوریا در حدود 20% بود. نتایج مقاومت‌های فشاری 28 روزه عملاً تابع وزن آزمونه‌ها است و با کاهش آن، مقاومت نیز کاهش می‌یابد.
 - ۲- مقاومت کششی شکافتی بتن‌های سبک‌دانه پرعیار حاوی لیکا عملاً به طور متوسط در حدود $0/11$ مقاومت فشاری استوانه‌ای بود. این مقدار در بتن‌های حاوی اسکوریا نیز در همین حدود بوده است.
 - ۳- مدول الاستیسیته استاتیکی بتن‌های حاوی لیکا با توجه به بافت دانه بندی عملاً بین حدود 15 تا 19 گیگاپاسکال بود. این مقدار برای بتن‌های حاوی اسکوریا بین 17 تا $19/50$ گیگاپاسکال بود.
 - ۴- ضریب پواسون بتن‌های حاوی لیکا و اسکوریا عملاً به طور متوسط $0/19$ و $0/22$ تعیین شد.
 - ۵- نسبت مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی به استوانه‌ای در بتن‌های حاوی لیکا و اسکوریا کمتر از 1 می‌باشد؛ و در محدوده $0/92$ تا $0/89$ ثبت شد.

مراجع:

1. I.B. Topcu, Semi-lightweight concretes produced by volcanic slags, Cem. Concr. Res. 27(1) (1997) 15-21
2. H. Al-Khaiat, M.N. Haque, Effect of initial curing on early strength and physical properties of lightweight concrete, Cem. Concr. Res. 28(6) (1998) 859-866
۳. تدین، محسن، "بررسی‌های ارزیابی مقاومت کششی، مدول ارتجاعی، ضریب پواسون و شدت خوردگی بتن سبک پر مقاومت با مصالح موجود در ایران"، پایان‌نامه دکتری، دانشکده عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، شهریور ۱۳۸۱
4. 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, pp.29-37, 1999.
5. European Union-Brite Euram III, "Definitions and International Consensus Report", BE96-3942/R1, 1998.
6. M.H. Zhang, O.E. Gjorv, Characteristics of lightweight aggregates for high-strength concrete, ACI Mater. J., 1991(March-April)150-8
7. C.C. Yang, R. Huang, Approximate strength of lightweight aggregate using micromechanics method, Adv. Cem. Based Mater. (1998);7(3-4): 133-8
8. R. Wasserman, A. Bentur, Effect of lightweight fly ash aggregate microstructure on the strength of concretes, Cem. Concr. Res. 1997;27(4):525-37
9. ASTM C330, "Standard Specification for Lightweight Aggregates for Structural Concrete", ASTM, 1999.
10. ASTM C33, "Standard Specification for Concrete Aggregates", ASTM, 1999.
11. ACI 211.1R, "Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete", ACI 211.1-R
12. ACI 211.2R, "Standard Practice for Selecting Proportions for Structural Lightweight Concrete", ACI 211.2R
۱۳. فامیلی، هرمز، "خواص بتن"، ابوریحان بیرونی، چاپ اول، ۱۳۷۸
14. ACI 318R-05, "Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-05) and



Commentary ACI 318R-05", ACI 318R-05

15. ACI 363R-92, "State-of-the-Art Report on High-Strength Concrete", ACI 363R-92
16. FIP, "Manual of Lightweight Aggregate Concrete", 2nd Edition, 1983ENV1992-1
17. fib, "Lightweight Aggregate Concrete", Guidance document, Bulletin8, 2000
18. Nevil, A.M, "Properties of Concrete", Longman, 3rd Edition, 1981
19. Slate, F.O., Nilson, A.H., Martinez, S., "Mechanical Properties of High Strength Lightweight Concrete", ACI Materials Journal, Vol.3, pp.606-613, 1986.
20. Popovics, S., "Strength and Related Properties of Concrete, a Quantitative Approach", JohnWiley, 1998.