

مقایسه طرح اختلاط و مقاومت فشاری بتن های سبک ساخته شده با سبک دانه های لیکا، اسکریا و پرلیت با استفاده از روش پیچش*

محمود نادری^(۱) علیرضا بنیادی^(۲)

چکیده باتوجه به رشد روز افزون تقاضا برای استفاده از بتن سبک، به ویژه بتن سبک سازه ای و بالا بردن ضریب اطمینان سازه در برابر زلزله بنا به آئین نامه ۲۸۰۰، پژوهش برای به دست آوردن نتیجه های بهینه از بتن های سبک امری اجتناب ناپذیر است. از آنجا که یکی از روش های تولید بتن سبک استفاده از دانه های سبک می باشد و با توجه به نقش این دانه ها در مقاومت بتن، ارائه طرح اختلاط بهینه برای بتن های سبک دانه اهمیت دارد. در این مقاله، بتن های سبک دانه ساخته شده با ۳ گونه سبک دانه لیکا، پرلیت و پوکه معدنی اسکریا مورد بررسی قرار گرفته اند. با استفاده از بتن های یاد شده، ۱۲۰ نمونه مکعبی استاندارد با آزمایش های مقاومت فشاری معمول و روش پیچش آزموده شدند. افزون بر ارائه وابستگی میان نتیجه های حاصل از آزمایش های پیچش و مقاومت فشاری، تاثیر افزودنی ها در ویژگی های بتن های به دست آمده نیز ارائه شده است. **واژه های کلیدی** بتن سبک دانه، لیکا، پرلیت، پوکه معدنی، مقاومت فشاری، روش پیچش.

Comparison of Mix-Design and Compressive Strengths of Leca, Scoria and Perlite Lightweight Concretes with Using Twist-off Method

M. Naderi

A. Bonyadi

Abstract Regarding the increasing demand for lightweight concrete especially lightweight structural concrete, and safety requirements underlined in 2800 Iranian standard, research to achieve the optimized results in lightweight concrete production seems inevitable. Since, one of the commonly used methods for producing the light weight concrete, utilizes the light weight aggregates with significant role in the concrete strength, proposing the optimized mix-design for the light weight concrete appears to be important. In this paper, concretes made from leca, perlite and scoria, are investigated. By using the light weight concrete, 120 cubic specimens were constructed and tested by compression and twist-off methods. In addition to the relationships between the results of compression tests and twist-off method, effects of the additives on the properties of the lightweight concretes are presented.

Key Words Lightweight Aggregate Concrete, Leca, Scoria, Perlite, Compressive Strength, Twist-off Method.

*نسخه ی اول مقاله در تاریخ ۱۳۸۹/۱۰/۱ و نسخه ی نهایی آن در تاریخ ۱۳۹۰/۱۰/۲۷ به دفتر نشریه رسیده است.

(۱) نویسنده ی مسئول، دانشیار دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)

(۲) دانش آموخته ی کارشناس ارشد سازه دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)

مقدمه

گرچه استفاده از بتن سبک به عنوان مصالح سبک در صنعت ساختمان سازی در حدود ۶۰ سال قدمت دارد، ولی پیشینه استفاده از مصالح سبک به زمان روم باستان برمی گردد. جایی که رومیان باستان در ساخت بنای تاریخی ورزشگاه کلوزیوم و معبد پائتتون، از سبک‌دانه پومیس استفاده کردند [1]. در اوایل قرن بیستم در زمان جنگ جهانی اول، بتن سبک به علت کمیاب شدن ورق‌های فولادی، در ساخت بدنه کشتی‌های مختلفی به کار رفت. نمونه‌ای از این کشتی‌ها، کشتی سلما می‌باشد که در حدود ۵۰ سال بر روی آب شناور بوده است. در دهه‌ی ۵۰ میلادی استفاده از بتن سبک در ساخت انواع سازه‌ها رونق ویژه‌ای پیدا کرد. به طوری که در دهه‌های ۵۰ و ۶۰ میلادی صدها سازه با به کار گیری بتن سبک در نقاط مختلف دنیا به ویژه در امریکای شمالی و مرکز اروپا ساخته شد. هتل پارک پلازا در سنت لوئیز و ساختمان ۴۲ طبقه مسکونی در شیکاگو امریکا و پل ایستگاه قطار ویسبادن آلمان از مجموعه بناهایی می‌باشد که در دهه‌ی ۵۰ و ۶۰ میلادی با استفاده از بتن سبک ساخته شده‌اند و هنوز کاربری دارند [2]. سبک سازی منجر به کاهش نیروی زلزله وارد بر ساختمان شده و علاوه بر بالا بردن سطح ایمنی لرزه‌ای ساختمان، باعث کوچکتر شدن ابعاد عضوهای سازه‌ای مانند تیرها و ستون‌ها و دیوارهای برشی و در نهایت شالوده سازه شده و کاهش مصرف مصالح سازه‌ای به کار رفته همچون سیمان و میلگرد را نیز در پی خواهد داشت. همچنین، به علت ویژگی منحصر به فرد مصالح سنگی سبک که بیشتر متخلخل می‌باشند، استفاده از آن‌ها در بتن‌های سازه‌ای و غیرسازه‌ای در حفظ و صرفه جویی منابع انرژی بسیار موثر خواهد بود. با توجه به زلزله خیز بودن ایران از یک سو و مصرف بیش از حد انرژی به دلیل ضعف سامانه عایق‌بندی (صوتی و حرارتی) بیشتر ساختمان‌ها از سوی دیگر، اهمیت و لزوم استفاده از بتن سبک، آشکار می‌شود. با این‌که نزدیک به یک قرن از تولید سبک‌دانه و

فن آوری‌های گوناگون تولید بتن سبک برای مصرف سازه‌ای و غیرسازه‌ای در دنیا می‌گذرد، ولی متأسفانه در کشور ما هنوز استفاده از این مواد جایگاه شایسته خود را پیدا نکرده است و بخش قابل توجهی از کاربری‌های کنونی سبک‌دانه‌های موجود (اعم از سبک‌دانه‌ای طبیعی و مصنوعی) به عنوان پرکننده و شیب ساز در صنایع ساختمانی و راهسازی می‌باشد.

دلیل‌های عمده استفاده از بتن سبک را می‌توان به شرح زیر بیان کرد:

- کاهش بار وارده بر سازه و در نتیجه آن کاهش نیروی موثر زلزله و دیگر بارهای جانبی.
- کاهش ابعاد سازه‌ای و غیرسازه‌ای که منجر به افزایش فضای معماری ساختمان می‌شود.
- استفاده از بتن سبک در زمینه مقاوم سازی و یا گسترش سازه‌هایی همچون عرشه پل برای افزایش ظرفیت ترافیکی، بدون اینکه تغییری در شالوده سازه‌ها به وجود آید.
- افزایش ظرفیت بار زنده سازه‌ها.
- عایق صوتی و حرارتی بسیار مناسب برای استفاده در ساختمان‌هایی مانند بیمارستان‌ها، مدارس.
- مقاومت مطلوب در برابر آتش‌سوزی. - افزایش سرعت اجرا.
- امکان ساخت سازه‌های بلند مرتبه در نواحی متراکم.
- ساخت قطعات پیش ساخته سبک بتنی به صورت سازه‌ای و غیرسازه‌ای.

هدف اصلی در این پژوهش، بررسی بتن سبک‌دانه از نظر ترکیب طرح اختلاط در شرایط به نسبت یکسان از نظر مقدارهای حجمی و همچنین به کارگیری مواد افزودنی معدنی مانند میکروسیلیس و خاکستر بادی و مواد افزودنی شیمیایی که شامل فوق روان کننده‌ها می‌باشد؛ و همچنین تعیین میزان مقاومت فشاری و تعیین مقاومت تحملی پیچشی بتن سبک‌دانه و ارائه رابطه بین مقاومت فشاری و مقاومت به دست آمده از روش پیچش بتن سبک، بوده است. با توجه به این مطلب که همه

[3]. در ایران تنها یک کارخانه به نام لیکا به تولید سبک‌دانه‌های رس منبسط شده می‌پردازد. ویژگی‌های فیزیکی لیکا بر اساس آزمایش‌های انجام شده در این پژوهش، در جدول (۱) بیان شده است.

جدول ۱ ویژگی‌های فیزیکی لیکا*

نوع نمونه	میانگین وزن مخصوص ظاهری (دانه‌ای) (kg/m^3)	درصد جذب آب (%)
لیکای سازه‌ای درشت دانه	۶۶۰	۱۴
لیکای سازه‌ای ریزدانه	۸۶۰	۱۶
لیکای معمولی ریزدانه	۵۷۰	۲۵

* وزن مخصوص توده‌ای لیکا در حدود ۳۳۷ کیلوگرم بر مترمکعب می‌باشد.

پرلیت. در معمول برای به‌دست آوردن سبک‌دانه پرلیت از سنگ پرلیت، نخست سنگ پرلیت را در داخل کوره‌های دوار به دمای ۸۵۰ تا ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد می‌رسانند و سنگ به صورت شیشه‌ای نرم حاصل می‌شود. در این حالت آب از لابه لای سنگ بصورت کامل تخلیه شده و توده‌های سنگ به اندازه ۷ تا ۱۵ برابر افزایش حجم پیدا می‌کنند. مصالح جدید که از نظر شکل بزرگ و حجیم شده‌اند، سفید رنگ در ابعاد و قطعه‌های بزرگ و نامرتب بوده و سفیدی آن‌ها به دلیل بخارهای حاصل از تبخیر مایعات و آب از داخل سنگ می‌باشد. وزن مخصوص سنگ پرلیت در حالت خام و منبسط نشده در حدود ۱۱۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب هست. ولی وزن مخصوص حالت منبسط شده آن به صورت سبک‌دانه پرلیتی در بازه‌ی ۳۰ تا ۱۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب می‌باشد [4]. ویژگی‌های فیزیکی پرلیت براساس آزمایش‌های انجام شده در این تحقیق، در جدول (۲) ارائه شده است.

بتن‌های سبک به سه روش استفاده از سبک‌دانه، سبک کردن خمیره سیمان و حذف ریز دانه از مخلوط بتن ساخته می‌شود، ولی تنها بتن سبک‌دانه دارای مقاومت مطلوب سازه‌ای می‌باشد، در این پژوهش از سه الگوسبک‌دانه مصرفی به نام لیکا، پرلیت و اسکریا استفاده شد. برای تعیین مقاومت پیچشی نمونه‌های مکعبی بتنی، از روش نوین با خرابی جزئی به نام روش پیچش بهره گرفته شده است. این روش در اساس روشی ساده، با دقت زیاد، همراه با آسیب‌های جزئی بوده و برای انجام آن نیاز به تجهیزات و مصالح خاصی نمی‌باشد. پس از به‌دست آوردن نتیجه‌های مقاومت فشاری و مقاومت حاصل از روش پیچش، رابطه بین این دو کمیت برای هر یک از سبک‌دانه‌های مورد استفاده به صورت جداگانه در قالب نمودار بیان شده است. تلاش بر این است که با استفاده از نمودار واسنجی (caliberation) میان این دو کمیت، هر زمان که از روش پیچش برای تعیین مقاومت فشاری بتن سبک‌دانه در هر مکانی استفاده شد، به راحتی بتوان با تعیین مقاومت پیچشی مقطع بتنی، مقاومت فشاری آن را تعیین کرد.

مصالح به‌کار گرفته شده در ساخت بتن سبک

لیکا. مواد خامی که برای سنگدانه‌های سبک سازه‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرند، در معمول از ته نشینی مصالح طبیعی مانند رس، شیل و اسلیت که دارای مقدار زیادی سیلیس می‌باشند، تشکیل می‌شوند. دو نوع از روش‌های تولید آن‌ها روش کوره دوار و روش رسوب گذاری است. در هر دو روش نام برده، به مواد خام نا هنگام انبساط گرما داده می‌شود. در فرایند انبساط، گرما تا زمانی ادامه می‌یابد که گازهای درونی آن‌ها آزاد شده و مصالح به شکل نرم و انعطاف پذیر درآیند، ولی کامل ذوب نشوند. حباب‌گازهای درونی، توده‌ای از سلول‌های هوای جدا از به هم ایجاد کرده و پس از سرد شدن، این مواد در درون آن‌ها باقی می‌مانند. بنابراین، مواد خام منبسط شده و سنگدانه‌هایی با وزن مخصوص پایین‌تر به دست می‌آید

مورد نظر محاسبه می شوند. جدول (۳) نتیجه‌های این آزمایش‌ها را نشان می‌دهد. هر یک از عدد‌های داخل جدول (۳)، میانگین نتیجه‌های ۱۰ مجموعه آزمایش می‌باشد.

شن. در این پژوهش از شن محدوده شهرستان قزوین با ترکیبی از شن نخودی و بادامی استفاده شده است. براساس بیشتر آئین نامه‌های معتبر در مورد دانه‌بندی سنگ‌دانه مصرفی در بتن سبک، بیشترین قطر مجاز برای سنگ‌دانه مصرفی در داخل این بتن، به ۲۰ میلی‌متر محدود می‌شود. برابر ASTM-C33 [7] نیز مقدار پیشنهادی برای بیشترین قطر پیشنهادی برای سنگ‌دانه مصرفی در بتن سبک ۱۹/۵۰ میلی‌متر است. آئین نامه ACI-211.2 [8]، انتخاب مصالح شامل سنگ‌دانه برای ساخت بتن سبک سازه‌ای را نیز شرح داده و بیشترین قطر مجاز برای سنگ‌دانه مصرفی در بتن سبک را کوچکتر از ۱۹/۰۵ میلی‌متر می‌داند. از این‌رو، شن مصرفی در نمونه‌های ساخته شده، الک شده و محدوده‌ی مجاز بیشترین قطر ۲۰ میلی‌متر مورد استفاده قرار گرفته است. وزن مخصوص ظاهری و جذب آب این شن در حدود ۲۵۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب و ۱/۸٪ می‌باشد.

جدول ۲ ویژگی‌های فیزیکی پرلیت*

درصد جذب آب (%)	میانگین وزن مخصوص ظاهری (دانه‌ای) (kg/m ³)	نوع نمونه
۱۲	۲۱۰	پرلیت نیمه سازه‌ای نیمه درشت
۱۸	۳۲۵	پرلیت معمولی ریزدانه

*وزن مخصوص توده‌ای پرلیت در حدود ۱۶۲/۵ کیلوگرم بر متر مکعب می‌باشد.

پوکه معدنی / اسکریا. سنگ پسا، با نام علمی اسکریا قدیمی‌ترین سبک‌دانه‌ای است که مورد استفاده قرار گرفته است. این سنگ در اثر ورود مواد مذاب آتشفشانی به مخزن‌های آب مانند دریاها و دریاچه‌ها و تخلیه‌ی گاز در هنگام انجام سریع ماگمای روان ایجاد می‌شود. از دیدگاه ماکروسکوپی، پوکه معدنی اسکریا به رنگ خاکستری تیره که به قهوه‌ای می‌گراید و ظاهری شبیه به سنگ پسا دارد، می‌باشد [5]. ده آزمایش وزن مخصوص در حالت خشک و اشباع، آزمایش تعیین Gs مصالح، درصد تخلخل و درصد جذب آب انجام شد. آزمایش‌های این بخش براساس استاندارد ASTM-C94 و ASTM-C97 هستند. بدین صورت که با داشتن وزن مصالح در حالت خشک و اشباع در هوا و به‌صورت شناور در آب، عامل‌های

جدول ۳ ویژگی‌های فیزیکی اسکریا*

درصد جذب آب (%)	درصد تخلخل (%)	Gs	میانگین وزن واحد حجم اشباع (kg/m ³)	میانگین وزن واحد حجم خشک (kg/m ³)	میانگین وزن مخصوص ظاهری (دانه‌ای) (kg/m ³)	نوع نمونه
۱۵/۱۰	۷۰۰	۱۵۳۰	۱۷۶۰	۲/۰۱	۳۱	طبقه بندی نوع ۱
۱۵/۸۰	۷۵۰	۱۵۷۰	۱۸۱۶	۲/۰۸	۳۳	طبقه بندی نوع ۲
۲۹/۴۳	۹۵۰	۱۵۹۰	۱۹۲۰	۲/۲۵	۵۱	طبقه بندی نوع ۳

*حدود وزن مخصوص توده‌ای برای اسکریا ریزدانه ۳۸۸/۵ کیلوگرم بر متر مکعب و برای اسکریا درشت دانه حدود ۵۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب می‌باشد. دانه‌بندی کلیه سبک‌دانه‌ها بر اساس ASTM-C330 انجام شده است و بیشترین قطر همه سنگ‌دانه‌ها ۲۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده است [6].

کلسیم روی سطح بتن رسوب می کند، در نتیجه ضمن ایجاد فضای خالی و افزایش خلل و فرج در بتن، از ویژگی های مکانیکی و دوام آن می کاهد. سولفات ها نیز می توانند با هیدروکسید ترکیب شده و ضمن تولید گچ یا سولفور آلومینات کلسیم، حجم آن را چندین برابر افزایش دهند. این تغییر حجم باعث ایجاد ترک و آسیب دیدگی بتن می شود. واکنش های قلیایی سنگدانه ها نیز با وجود هیدروکسید کلسیم در خمیر سیمان تشدید می شود. به دین ترتیب هیدروکسید کلسیم جزء تضعیف کننده مخلوط بتن بوده و به علت ناپایداری، منشاء ضعف بتن است [10]. حضور کریستال های بزرگ هیدروکسید کلسیم در سطح مشترک سنگدانه و خمیر سیمان، سبب می شود که با ایجاد مانعی در برابر تولید کریستال های سخت و مقاوم، از یک پیوند خوب پیشگیری شود. استفاده از میکروسیلیس در بتن با کاهش کریستال های ناپایدار، موجب می شود که پیوستگی بین خمیر سیمان مصالح سنگی بهبود یابد. بنابراین، در بتن دارای میکروسیلیس با بهبود کیفیت اتصال بین خمیر و سنگدانه مقاومت بتن نیز افزایش می یابد. این تاثیر عامل اصلی افزایش مقاومت بتن می باشد.

خاکستر بادی. خاکستر بادی محصول نوعی سوخت ذغال سنگ است و کانی های تشکیل دهنده آن شامل اکسیدهای سیلیس، آلومین و آهن و کلسیم است. در نیروگاه هایی که از ذغال سنگ به عنوان سوخت استفاده می کنند، ذرات شیشه ای و کروی شکل بسیار ریز به ابعاد ۱ الی ۸۰ میکرون و در درجه ی ۱۶۰۰ درجه سیلیسیوس به عنوان محصول فرعی تولید می شود که از بالای کوره احتراق خارج و به سرعت سرد می شود. این محصول در مقایسه با ابعاد دانه ای سیمان که مقاومت سیمان را فراهم می کند کمی درشت بوده و در مقایسه با ابعاد دانه ای دوده سیلیسی که به شکل ذرات کروی شکل کوچک هستند، بسیار درشت اند. لازم بذکر است که ابعاد دانه ای سیمان مابین ۱۰ الی ۲۴ میکرون و ابعاد دانه ای دوده سیلیسی

ماسه. ماسه مورد نظر برای استفاده در ساخت بتن سبک دانه از منطقه قزوین تهیه شد که وزن مخصوص ظاهری و جذب آب آن در حدود ۲۶۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب و ۴/۸٪ بود. لازم به یادآوری است که حدود ۱۸٪ از این ماسه شن بوده که جداسازی برای ساخت نمونه ها انجام گرفته است.

سیمان پرتلند پوزولانی. سیمان پرتلند پوزولانی معمولی، مخلوطی است از حداقل ۵ و بیشترین ۱۵ درصد پوزولان طبیعی و دست کم ۸۵ درصد کلینکر یا سیمان پرتلند با نرمی مشخص که در کنار آب به صورت جسم چسبنده ای در کارهای ساختمانی مصرف می شود. پوزولان یک ماده طبیعی یا مصنوعی دارای سیلیس فعال یا سیلیس آلومیناتی است که به تنهایی ارزش چسبندگی ندارد، ولی به صورت گرد نرم و در حضور رطوبت و در دمایی معمولی با هیدروکسید کلسیم واکنش شیمیایی حاصل کرده و ترکیباتی را که ویژگی های چسبندگی دارد، به وجود می آورد. ماده پوزولانی بایستی به صورت آسیاب شده باشد تا در حضور آب با آهک، سیلیکات های کلسیم پایدار با ویژگی های چسبندگی ایجاد کند. مواد پوزولانی از خاکستر آتشفشانی غیر بلورین - پوزولانی اصلی - پودرسنگ، سنگ های رسی و چرت های اوپالینی، خاک دیاتومه ای کلسینه شده، خاک رس پخته شده، خاکستر بادی و دوده سیلیسی و غیره به دست می آید [9]. ویژگی های کلی این گونه سیمان با نام سیمان نوع ۲ در ASTM-C150 آمده است.

میکروسیلیس. میکروسیلیس بسیار نرم و به صورت گوگرد و مرکب از مواد بلوری با قطرهای بین ۰/۱ و ۰/۲ میکرون می باشد. به دنبال واکنش هیدراتاسیون سیمان، هیدروکسید کلسیم آزاد شده در حدود ۲۰ تا ۲۵ درصد حجم ملات را تشکیل می دهد و این در حالی است که این جزء می تواند به سادگی در آب حل شده و به خارج از بتن انتقال یابد (در معمول به صورت گرد کربنات

روانی ثابت و افزایش مقاومت نهایی بتن به کار می رود و با استاندارد ASTM-C494 نوع F و استاندارد ASTM-C1017 نوع I مطابقت دارد. میزان مصرف این فوق روان کننده طبق آئین نامه بین ۱ تا ۲ درصد وزن مصالح سیمانی بنا به پروتکت هوا و کارائی بتن پیشنهاد شده است. وزن مخصوص این فوق روان کننده ۱۰۷۰ کیلوگرم بر مترمکعب و دارای رنگ صورتی بات PH حدود ۷ می باشد و به صورت مایع توانایی حل شدن در آب را دارد.

طرح اختلاط

در طول این پژوهش برای ساخت نمونه و طرح اختلاط انواع بتن سبک‌دانه از ASTM-C330 [6]، ASTM-C192 [13]، ASTM-C567 [14]، ACI-211.2 [8] و ACI-318 [15] استفاده شده است. به طور کلی نمونه‌های مکعبی بتنی با ابعاد ۱۰ سانتی‌متر در هر وجه، برای آزمون مقاومت فشاری به روش تعیین مقاومت فشاری آزمایشگاهی و همچنین به روش پیچش ساخته شده‌اند. جدول‌های محاسبات طرح اختلاط بر اساس رابطه‌های درج شده در ACI-211.2 [8] و به روش حجمی مطلق محاسبه شده است. در جدول ۴، طرح اختلاط انواع بتن‌های سبک‌دانه با طرح اختلاط به نسبت مشابه بدون استفاده از مواد افزودنی معدنی ارائه شده است. در ادامه برای هر کدام از سبک‌دانه‌ها، با توجه به نوع سبک‌دانه، از میکروسیلیس با ۳ درصد متفاوت ۵٪، ۱۰٪ و ۱۵٪ و از خاکستر بادی به اندازه ۲۰٪ وزنی مصالح سیمانی، استفاده شده است.

آنچه که در جدول‌های (۴)، (۶)، (۷) و (۸) بیان شده است، روندی از مقدارهای محاسباتی طرح اختلاط برای مقایسه ۳ سبک‌دانه با یکدیگر می باشد.

لازم به یادآوری است که همه مقدارهای وزنی در محاسبات طرح اختلاط بر اساس کیلوگرم بر مترمکعب می‌باشد.

۰/۱ تا ۰/۲ میکرون می باشد. این محصول که خواص پوزولانی دارد، خاکستر بادی نام دارد و از اختلاط دو فاز شیشه‌ای نشده که ۶۰ الی ۹۰ درصد وزنی محصول را تشکیل می دهد و فاز بلوری نشده که ۱۰ الی ۴۰ درصد وزنی محصول را تشکیل می دهد، تشکیل شده است. معمولاً خاکستر بادی به دو نوع تقسیم بندی می شود. چنانچه مجموع درصد وزنی سه کانی اکسیدهای سیلیس، آلومینیوم و آهن دست کم ۷۰ درصد وزنی محصول و اکسیدکلسیم کمتر از ۱۰ درصد وزنی محصول را تشکیل دهد، این محصول خاکستر بادی نوع F و یا کم کلسیم نامیده خواهد شد. چنانچه مجموع درصد وزنی سه کانی اکسیدهای سیلیس و آلومینیوم و آهن دست کم ۵۰ درصد وزنی محصول و اکسیدکلسیم بیشتر از ۱۰ درصد وزنی آن را تشکیل دهد، این محصول خاکستر بادی نوع C و یا پرکلسیم نامیده می شود. خاکستر بادی نوع F ویژگی پوزولانی و خاکستر نوع C افزون بر ویژگی های پوزولانی، ویژگی های سیمانی دارد [11]. ویژگی‌ها و کیفیت خاکستر بادی به عامل‌های گوناگونی مانند نوع ذغال سنگ و ترکیب آن، کارایی آسیاب خردکننده ذغال، شرایط احتراق شامل درجه حرارت و مقدار اکسیژن لازم برای سوختن و نوع کوره و به ویژه سرعت سرد شدن ذرات بستگی دارد.

فوق روان ساز. فوق روان کننده‌ها، کاهنده های قوی آب نیز خوانده می‌شود، زیرا در مقایسه با مواد افزودنی کاهنده آب معمولی، سه تا چهار برابر بیشتر می‌توانند آب در مخلوط بتنی را کاهش دهند. فوق روان کننده‌ها باعث کاهش کشش سطحی آب شده و روانی مجموعه را به میزان زیادی افزایش می‌دهند [12]. در پژوهش حاضر از یک نوع فوق روان کننده با ویژگی‌هایی که در ادامه بیان می شود، به منظور ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی استفاده شده است، که فوق روان کننده نوترال به نام بتن شیمی ۱۰۲N محصول شرکت بتن شیمی می‌باشد. این فوق روان کننده برای افزایش کارایی بتن و کاهش آب اختلاط با

جدول ۴ جدول محاسباتی مقایسه طرح اختلاط میان ۳ بتن سبک‌دانه ساخت شده از لیکا، اسکریا و پرلیت

نوع بتن	نسبت آب به سیمان	حجم خمیره سیمان	مقدار وزن سیمان	مقدار وزنی آب	حجم ماسه	مقدار وزن ماسه	مقدار حجم سبک‌دانه	مقدار وزن سبک‌دانه	درصد حجم هوا	درصد روان کننده
بتن سبک‌دانه با لیکا	۰/۲۵	۰/۳	۵۷۹/۲	۱۴۵	۰/۲۸	۷۴۲	۰/۴	۲۴۲/۶	۰/۰۲	۲
بتن سبک‌دانه با اسکریا	۰/۲۵	۰/۳	۵۳۵/۷	۱۳۴	۰/۲۸	۷۴۲	۰/۴	۳۲۰	۰/۰۲	۲
بتن سبک‌دانه با پرلیت	۰/۲۵	۰/۳۵	۷۷۲/۶	۱۹۴	۰/۲۳	۶۰۹/۵	۰/۴	۱۳۰	۰/۰۲	۲

که در آن a و b ضریب‌هایی بر اساس جدول (۴-۹) و ρ چگالی دانه‌ای سبک‌دانه بر حسب کیلوگرم بر متر مکعب است.

برای همه سبک‌دانه های طبیعی یا تولید شده در کارخانه، رابطه‌های متفاوتی میان مقاومت و چگالی دانه‌ای سبک‌دانه‌ها موجود می‌باشد. روش‌های ویژه‌ای برای اندازه‌گیری مقاومت دانه‌های سنگدانه وجود دارد. به دلیل اینکه دانه‌ها با زمینه پیرامون خود، یعنی خمیره سیمان یا ملات، اندرکنش دارند، روش اندازه‌گیری بر پایه‌ی برآورد مقاومت سنگ‌دانه در بتن است. نتیجه‌های به‌دست آمده برای برآورد ضریب‌های a و b در معادله (۲) استفاده می‌شود.

رابطه میان مقاومت ملات، سبک‌دانه‌ها، بتن و حجم ملات یا حجم سبک‌دانه‌ها با استفاده از رابطه‌های زیر محاسبه می‌شود:

$$m = v_{la} \times \log f_{la} + v_m \times \log f_m \quad (3-الف)$$

$$\log f_m$$

و یا:

$$\log f_M = (\log f_{con} - v_{la} \times \log f_{la}) / (1 - v_{la}) \quad (3-ب)$$

که در آن :

برای رسیدن به طرح اختلاط بتن سبک، از رابطه‌های آئین نامه های ACI-211.2 [8] و ACI-318 [15] به صورت زیر استفاده می‌شود:

$$m > f_{ck} + \lambda \times S_n \quad (1)$$

که در آن :

m : میانگین مقاومت نمونه‌ها

S_n : انحراف معیار استاندارد مقاومت نمونه‌ها

F_{ck} : مقاومت مشخصه بتن

λ : ضریبی که به شمار نمونه‌ها در تحلیل آماری بستگی دارد.

ضریب تغییرات حدود ۵ تا ۱۰ درصد برای مقاومت و ۳ تا ۵ درصد برای چگالی است. انحراف معیار استاندارد برابر حاصلضرب ضریب تغییرات در میانگین مقاومت است.

مقاومت سبک‌دانه‌ها: پیشنهاد می‌شود که ملات بتن مقاومتی حدود دو برابر مقاومت سبک‌دانه‌ها داشته باشد. میانگین مقاومت سبک‌دانه‌ها با رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$f_{la} = a \times 10^{(b \rho / 1000)} \quad (2)$$

و در حالتی که $0.25 < W/C < 0.30$ باشد، ضریب A با درون‌یابی باید تعیین شود.
با توجه به تعریف پذیرفته شده، نسبت آب به سیمان برابر است با:

$$W/C = W \times 10^3 / C$$

که در آن W مقدار آب برحسب m^3 / m^3 و C مقدار سیمان برحسب کیلوگرم بر مترمکعب است. این رابطه برای ماسه طبیعی اعتبار دارد و برای ماسه سبک و نسبت آب به سیمان بیشتر از 0.8 توصیه نشده است.

در برخی موردها هوای اضافی به بتن وارد می‌شود. مانند هنگامی که مقاومت در برابر یخبندان و نمک‌های یخ زدا مورد نیاز است. در این حالت معادله (۵-الف) به معادله (۵-ج) تبدیل می‌شود:

$$W_a = \log(176 / f_M) \quad (5-ج)$$

که در آن W_a به صورت $(W + V_1) \times 10^3 / C$ و V_1 حجم هوای وارد شده در بتن برحسب m^3 / m^3 تعریف می‌شود. حجم هوا در این معادله نباید بیش از 10 درصد حجم کل بتن باشد.

حجم خمیر سیمان: حجم خمیر سیمان یا مواد سیمانی باید با اصل حجم ثابت خمیر سنگدانه سازگاری داشته باشد و در حدود 30 درصد حجم کل بتن باشد. حجم خمیر سیمان به عامل‌های زیادی بستگی دارد، برای مثال می‌توان به نوع و شکل سنگدانه، قوام، پایداری مخلوط بتن، مقاومت ملات یا بتن و جذب آب سبک‌دانه اشاره کرد. تجربه نشان داده که حتی برای بتن‌های با وزن معمولی، حجم خمیر سیمان یا مصالح سیمانی بیشتر در محدوده 30 ± 2 درصد قرار دارد. در برخی موردها به ویژه در بتن‌های بسیار پر مقاومت که در آن از دوده سیلیس استفاده می‌شود، حجم خمیر مواد سیمانی ممکن

f_{con} : مقاومت بتن، f_{la} : مقاومت سبک‌دانه، f_M : مقاومت ملات، V_{la} : حجم دانه‌های سبک‌دانه و V_M : حجم ملات است.

جدول ۵ مقدارهای دو ضریب a و b برای استفاده در معادله ۲

شماره سنگ‌دانه	a	b
۱	۱/۵۲	(۱/۰۳،۱/۰۸)۱/۴
۲	۱/۱۲	(۱/۱۱،۱/۱۶)۱/۲۲
۳	۱	(۱/۱۴،۱/۱۵)۱/۲۵
۴	۰/۸۹	(۱/۱۷،۱/۲۷)۱/۲۸

مقدارهای نشان داده شده در پراکنش برای ضریب b در جدول (۵)، با 5 و 10 درصد رطوبت سنگ‌دانه است. مقدار درصد رطوبت بر روی ضریب a تاثیری ندارد و یا تاثیر آن بسیار اندک می‌باشد.

مقاومت فشاری ملات: مقاومت فشاری ملات را می‌توان با استفاده از معادله (۱۰) محاسبه کرد. در این جا فرض می‌شود سیمان پرتلند معمولی و ماسه طبیعی استفاده شده و نوع و اندازه نمونه‌ها برای آزمایش‌ها ملات و بتن یکسان است.

(۴) $f_M = A \cdot 10^{-B \times W/C}$
که در آن A و B ضریب‌هایی هستند که به صورت تجربی تعیین می‌شوند.

با ضریب‌های $A=140$ و $B=0.87$ (سیمان پرتلند معمولی پس از 28 روز و نسبت آب به سیمان یا آب به مواد سیمانی بیشتر از 0.3)، مقاومت فشاری برابر است با:

$$f_M = 140 \times 10^{-0.87 W/C}$$

یا

$$W/C = \log(140 / f_M) / 0.87 \quad (5-الف)$$

در حالتی که $0.2 < W/C < 0.25$ باشد، از رابطه زیر استفاده می‌شود:

$$f_M = 160 \times 10^{-0.87 W/C} \quad (5-ب)$$

حجم کل بتن است. در بتن‌های با هوای اضافی وارد شده، کل حجم هوای اندازه‌گیری شده و یا محاسبه شده، در رابطه وارد می‌شود.

چگالی توده‌ای بتن: چگالی بتن را می‌توان از حاصل جمع وزن همه اجزای بتن متراکم شده در یک متر مکعب آن به دست آورد و یا از رابطه زیر استفاده کرد:

$$y_{con} = v_{la} \times y_{la} + y_M \times (1 - v_{la}) \quad (۷-الف)$$

یا

$$y_{con} = v_{la} \times y_{la} + v_M \times y_M \quad (۷-ب)$$

y_{con} چگالی توده‌ای بتن، y_{la} میانگین چگالی دانه‌ای سبک‌دانه‌ها و y_M چگالی ملات، می‌باشند.

است به ۳۴ درصد نیز برسد. هوای اضافی وارد شده به بتن نیز در حجم خمیر سیمان تاثیر می‌گذارد و حباب‌های ریز هوا موجب تغییرات رئولوژیک بتن تازه می‌شود و کارایی بتن را بهبود می‌بخشد.

عیار سیمان: عیار سیمان با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$C = 1000 \times v_p / (0.31 + W/C) \quad ((\text{Kg}/\text{m}^3)) \quad (۶)$$

که در آن v_p حجم خمیر سیمان موجود در بتن است.

حجم ماسه: حجم ماسه از رابطه زیر تعیین می‌شود:

$$v_g = 1 - (v_p + v_{la} + v_{air}) \quad (۶-۱)$$

که در آن v_{la} حجم سبک‌دانه و v_{air} حجم هوای موجود در بتن است. به طور طبیعی حجم هوا ۱/۵-۲ درصد از

جدول ۶ جدول محاسباتی طرح اختلاط برای بتن سبک ساخته شده از لیکا با افزودنی

بیش از ۳۰	بیش از ۳۰	بیش از ۳۰	بیش از ۳۰	محدوده مقاومتی در نظر گرفته شده برای محاسبات (MPa)
۳۳/۵	۳۳/۵	۳۳/۵	۳۳/۵	میانگین مقاومت نمونه‌ها (MPa)
۱۱۰	۱۱۰	۱۱۰	۱۱۰	مقاومت ملات محاسباتی Fm
۰/۳۰۴	۰/۳۲۵	۰/۳۱۱	۰/۲۷۷	نسبت آب به مصالح سیمان W/C
۰/۳	۰/۳	۰/۳	۰/۳	حجم خمیره سیمان v_p
۵۵۲	۵۸۶	۶۲۰/۵	۶۵۵	مقدار وزن سیمان C
۲۱۰	۲۲۴/۵	۲۱۵	۱۹۱	آب اختلاط موثر (Lit) W
۰/۲۸	۰/۲۸	۰/۲۸	۰/۲۸	حجم ماسه v_s
۷۴۲	۷۴۲	۷۴۲	۷۴۲	مقدار وزن ماسه S
۰/۴	۰/۴	۰/۴	۰/۴	حجم سبک‌دانه v_{la}
۲۴۲/۶	۲۴۲/۶	۲۴۲/۶	۲۴۲/۶	وزن سبک‌دانه La
۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۲	حجم هوا v_a
۰	۱۵	۱۰	۵	مقدار درصد میکروسیلیس از وزن کل سیمان
۲۰	۰	۰	۰	مقدار درصد خاکستر بادی
۲	۲	۲	۲	مقدار درصد فوق روان کننده

جدول ۷ جدول محاسباتی طرح اختلاط برای بتن سبک ساخته شده از پرلیت با افزودنی

بیش از ۲۰	بیش از ۲۰	بیش از ۲۰	بیش از ۲۰	محدوده مقاومتی در نظر گرفته شده برای محاسبات (MPa)
۲۳	۲۳	۲۳	۲۳	میانگین مقاومت نمونه‌ها (MPa)
۱۰۵	۱۰۵	۱۰۵	۱۰۵	مقاومت ملات محاسباتی Fm
۰/۳۱	۰/۳۳	۰/۳۱۵	۰/۳	نسبت آب به مصالح سیمان w/c
۰/۳۵	۰/۳۵	۰/۳۵	۰/۳۵	حجم خمیره سیمان Vp
۶۱۸/۱	۶۵۶/۷	۶۹۵/۴	۷۳۴	مقدار وزن سیمان C
240	255	243	232	آب اختلاط موثر W (Lit)
۰/۲۸	۰/۲۸	۰/۲۸	۰/۲۸	حجم ماسه Vs
۷۴۲	۷۴۲	۷۴۲	۷۴۲	مقدار وزن ماسه S
۰/۳۵	۰/۳۵	۰/۳۵	۰/۳۵	حجم سبک‌دانه V _{la}
۱۱۳/۸	۱۱۳/۸	۱۱۳/۸	۱۱۳/۸	وزن سبک‌دانه La
۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۲	حجم هوا Va
0	15	10	5	مقدار درصد میکروسیلیس از وزن کل سیمان
20	0	0	0	مقدار درصد خاکستر بادی
2	2	2	2	مقدار درصد فوق روان کننده

جدول ۸ جدول محاسباتی طرح اختلاط برای بتن سبک ساخته شده از اسکریا با افزودنی

بیش از ۳۰	بیش از ۳۰	بیش از ۳۰	بیش از ۳۰	محدوده مقاومتی در نظر گرفته شده برای محاسبات (MPa)
۳۴	۳۴	۳۴	۳۴	میانگین مقاومت نمونه‌ها (MPa)
۸۰	۸۰	۸۰	۸۰	مقاومت ملات محاسباتی Fm
۰/۳۵۶	۰/۳۶۲	۰/۳۵۵	۰/۳۲۱	نسبت آب به مصالح سیمان w/c
۰/۳	۰/۳	۰/۳	۰/۳	حجم خمیره سیمان Vp
۴۴۸/۸	۴۶۹/۶	۵۰۶/۳	۵۲۴/۸	مقدار وزن سیمان C
۱۹۷	۲۰۰	۱۹۷	۱۷۷	آب اختلاط موثر W (Lit)
۰/۲۳	۰/۲۳	۰/۲۳	۰/۲۳	حجم ماسه Vs
۶۰۹/۵	۶۰۹/۵	۶۰۹/۵	۶۰۹/۵	مقدار وزن ماسه S
۰/۴۵	۰/۴۵	۰/۴۵	۰/۴۵	حجم سبک‌دانه V _{la}
۳۶۰	۳۶۰	۳۶۰	۳۶۰	وزن سبک‌دانه La
۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۲	حجم هوا Va
۰	۱۵	۱۰	۵	مقدار درصد میکروسیلیس از وزن کل سیمان
۲۰	۰	۰	۰	مقدار درصد خاکستر بادی
۱/۵	۱/۵	۱/۵	۱/۵	مقدار درصد فوق روان کننده

است که یک استوانه فلزی به قطر ۴۰ و ارتفاع ۲۵ میلی متر، به کمک چسب که درمعمول یک ماده اپوکسی دو قسمته است، بر روی محل آزمایش که از قبل با سمباده تمیز شده، چسبانده می‌شود. پس از خشک شدن چسب و اتصال کامل استوانه فلزی به سطح بتن، به وسیله یک پیچش سنج دستی معمولی (Torque meter)، گشتاور پیچشی مستقیم به این استوانه وارد شده و به طور پیوسته و یکنواخت تا لحظه گسیخته شدن بتن از سطح زیرین استوانه افزایش می‌یابد. مقدار لنگر پیچشی که باعث کنده شدن استوانه فلزی از سطح بتن شده، ثبت و با به کارگیری نمودار واسنجی (Calibration) وابسته به آن، مقاومت معادل فشاری بتن برآورد می‌شود. خرابی حاصل از انجام این آزمایش بسیار جزئی بوده و در صورت نیاز به سادگی به کمک ملات و با دست ترمیم می‌شود [۱۶].

آزمایش‌های وسیعی که در تعیین مقاومت در جای بتن با استفاده از این روش صورت گرفته است، نشان می‌دهد که یک همبستگی تقریبی خطی میان مقاومت فشاری بتن و مقاومت حاصل از روش پیچش وجود دارد، به طوری که مقاومت فشاری، با یک تابع تقریبی خطی از مقاومت پیچشی نهایی وارد شده متناظر است. بنابراین با در اختیار داشتن مقاومت حاصل از روش پیچش و مراجعه به نمودارهای واسنجی می‌توان مقاومت فشاری بتن را با دقت بسیار بالایی اندازه‌گیری کرد. البته این مقدار برای بتن‌های معمولی در پژوهش‌های قبلی مورد آزمایش قرار گرفته است و مقدار وابستگی خطی بین این ۲ عامل برای بتن با وزن طبیعی ۰/۹۸۶ گزارش شده است [۱۷]. در این مقاله رابطه‌های حاصل از این روش برای بتن سبک‌دانه با لیکا، پرلیت و اسکریا محاسبه و ارائه شده است.

نتیجه آزمایش‌ها و تحلیل آن‌ها

آنچه که در این بخش به آن اشاره می‌شود، نتیجه‌های حاصل از پژوهش‌های آزمایشگاهی در مورد مقاومت در جای بتن ساخته شده با ۳ سبک‌دانه لیکا، پرلیت و اسکریا همراه با موادافزودنی شیمیایی و معدنی در زمینه میزان

مخلوط کردن مصالح اولیه برای رسیدن به بتن تر

در ابتدا سنگ‌دانه‌های طبیعی معمولی و سبک‌دانه‌ها به ترتیب از چگالی کم به چگالی زیاد وارد ظرف مخلوط کن شده و با یکدیگر آمیخته شده‌اند. زمان اختلاط برای این مرحله به صورت چشمی بوده و هنگامی که هم‌گنی تقریبی بین سنگ‌دانه‌ها مشاهده شد، عملیات مرحله‌ی بعدی انجام پذیرفت. در مرحله‌ی بعدی، در حدود یک سوم آب مورد نیاز و موثر اختلاط به مخلوط قبلی افزوده و زمان اختلاط بر این اساس تنظیم شد: ۱/۵ دقیقه اختلاط، ۳ دقیقه استراحت، ۱/۵ دقیقه اختلاط و ۳ دقیقه استراحت. پس از این مرحله، سیمان و مصالح دیگر سیمانی (در صورت وجود) به همراه یک سوم دیگر آب موثر به مخلوط قبلی اضافه و اختلاط به اندازه ۲ دقیقه انجام شد. پس از این مرحله، یک سوم باقی‌مانده آب به همراه افزودنی‌های شیمیایی (در صورت وجود) به صورت محلول به مخلوط قبلی افزوده و اختلاط نهایی به مدت ۴ دقیقه انجام گرفت. پس از پایان این مرحله‌ها مخلوط بتنی سبک‌دانه حاصل می‌شود.

روش پیچش

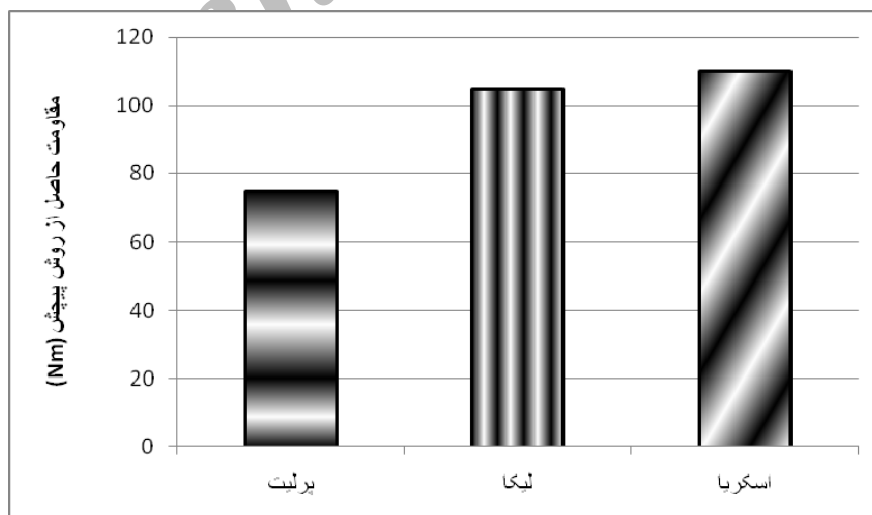
روش «پیچش» که به تازگی نادری [۱۶] آن را به عنوان آخرین و جدیدترین روش از گروه روش‌های «دارای خرابی جزئی» ابداع کرده است، یک روش دقیق با کاربری گسترده در تعیین مقاومت بتن هم در آزمایشگاه و هم در محل سازه بوده و به عنوان یک فن سریع، دقیق و کم هزینه با خرابی بسیار جزئی به حساب می‌آید. جذابیت این روش در دقت، سرعت انجام، سادگی، خرابی جزئی و هزینه اندک انجام آن است که آن را در مقایسه با دیگر آزمایش‌های درجا ممتاز ساخته است. این آزمایش در حالت‌های افقی، قائم و به طور کلی بر روی هر سطح صافی به سادگی و بدون نیاز به برنامه‌ریزی قبلی قابل انجام است. ابزار مورد استفاده در این آزمایش بسیار ساده و قابل دسترس بوده و انجام آزمایش نیز نیاز به مهارت قبلی ندارد. روش آزمایش بر این اساس استوار

فشاری ۳۱/۴ مگاپاسکال و متناظر با آن مقاومت حاصل از روش پیچش ۱۱۰ نیوتن متر به دست آمده است. همچنین، برای بتن سبک‌دانه ساخته شده با لیکا، مقاومت فشاری ۲۹/۱ مگاپاسکال و متناظر با آن مقاومت حاصل از روش پیچش ۱۰۵ نیوتن در متر به دست آمده است. برای بتن سبک‌دانه ساخته شده با پرلیت، مقاومت فشاری ۲۰/۳ مگاپاسکال و متناظر با آن مقاومت حاصل از روش پیچش ۷۵ نیوتن در متر به دست آمده است. ترتیب نسبت مقاومت فشاری و مقاومت حاصل از روش پیچش به ترتیب از زیاد به کم به این شرح است: الف) بتن سبک‌دانه با استفاده از اسکریا. ب) بتن سبک‌دانه با استفاده از لیکا. ج) بتن سبک‌دانه با استفاده از پرلیت.

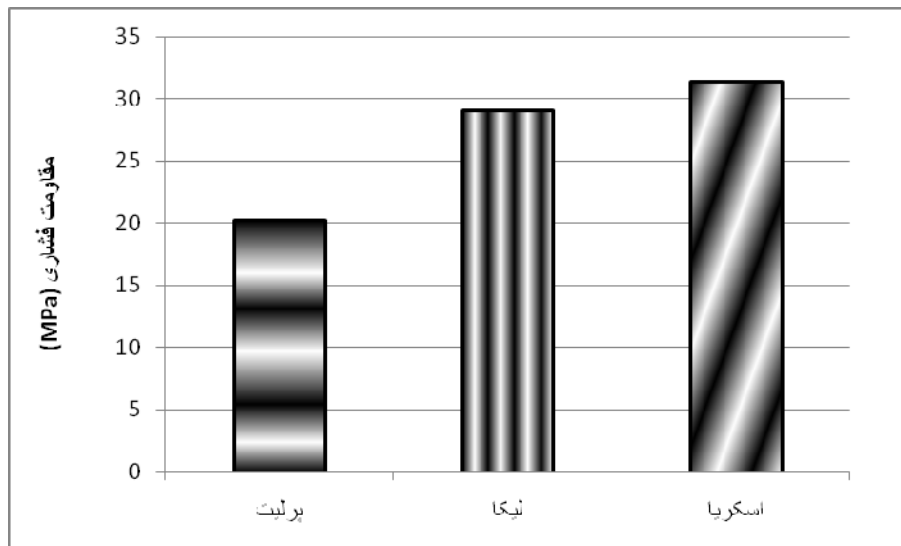
مقاومت فشاری تحملی نمونه های مکعبی بتنی $10 \times 10 \times 10$ سانتیمتر به دو روش آزمون مقاومت فشاری و روش پیچش، می باشد که در قالب جدول و نمودار بیان شده است. در این پژوهش بتن های سبک‌دانه با استفاده از افزودنی های شیمیایی و معدنی ساخته شده و هدف از به کارگیری این افزودنی ها، تولید بتن سبک‌دانه برای بتن سازه ای با مقاومت به نسبت بالا می باشد. همچنین بنا به طرح اختلاط جدول (۴)، مقایسه بین ۳ ویژگی مقاومت فشاری تحملی، مقاومت به دست آمده از روش پیچش و وزن مخصوص برای ۳ سبک‌دانه با طرح اختلاط به نسبت مشابه در قالب جدول (۹) و منحنی شکل های (۱)، (۲) و (۳) بیان شده است. آنچه از نتیجه های این پژوهش بر می آید، در شرایط طرح اختلاط مشابه، برای بتن سبک‌دانه با استفاده از پوکه معدنی اسکریا، مقاومت

جدول ۹ مقایسه نتایج ۳ بتن سبک‌دانه با طرح اختلاط مشابه

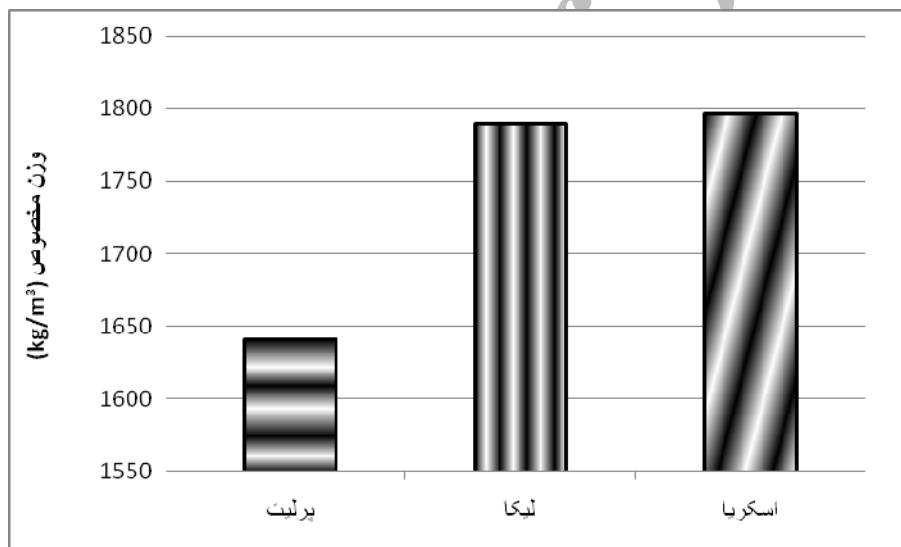
مقاومت حاصل از روش پیچش (Nm)	وزن مخصوص (kg/m ³)	مقاومت فشاری حاصل از روش مقاومت فشاری (MPa)	نوع بتن سبک‌دانه
۱۰۵	۱۷۸۹/۹	۲۹/۱	بتن سبک‌دانه ساخته شده با لیکا
۷۵	۱۶۴۱/۴	۲۰/۳	بتن سبک‌دانه ساخته شده با پرلیت
۱۱۰	۱۷۹۶/۵	۳۱/۴	بتن سبک‌دانه ساخته شده با اسکریا



شکل ۱ مقایسه ۳ سبک‌دانه با طرح اختلاط مشابه از لحاظ مقاومت حاصل از روش پیچش



شکل ۲ مقایسه ۳ سبک‌دانه با طرح اختلاط مشابه از لحاظ مقاومت فشاری



شکل ۳ مقایسه ۳ سبک‌دانه با طرح اختلاط مشابه از لحاظ وزن مخصوص

به صورت مقایسه‌ای هر یک از عامل‌های مقاومت فشاری، مقاومت حاصل از روش پیچش و وزن مخصوص را در ۳ درصد متفاوت ۵٪، ۱۰٪ و ۱۵٪ از میکروسیلیس و همچنین ۲۰٪ خاکستر بادی، برای هر یک از ۳ سبک‌دانه، بیان کرده اند. در بتن سبک‌دانه با لیکا، با استفاده از ۱۰٪ میکروسیلیس مقاومت فشاری ۳۴/۲۳ مگاپاسکال و متناظر با آن مقاومت حاصل از

با توجه به طرح اختلاط‌های جدول‌های (۶)، (۷) و (۸)، به‌طور جداگانه در هر یک از بتن‌های سبک‌دانه ساخته شده با لیکا و پرلیت و اسکریا، اثر استفاده از میکروسیلیس و خاکستر بادی بر مقاومت فشاری و مقاومت حاصل از روش پیچش و همچنین وزن مخصوص بررسی و نتیجه‌های آن در جدول‌های (۱۰)، (۱۱) و (۱۲) بیان شده است. منحنی اشکال ۴، ۵ و ۶ نیز

ساخته شده با پرلیت، نسبت به حالتی که از ۲۰٪ خاکستر بادی به عنوان ماده افزودنی معدنی در ساخت بتن استفاده شود، حاصل می‌آید. مقدار مقاومت فشاری حاصل از ۱۰٪ و ۱۵٪ میکروسیلیس در نمونه‌های بتن سبک با پرلیت، بسیار نزدیک به هم و با اختلاف کمتر از ۰/۴ مگا پاسکال می‌باشد. در مورد سبک‌دانه اسکریا، میزان مقاومت فشاری با استفاده از ۱۵٪ میکروسیلیس، ۳۷/۷۷ مگا پاسکال و مقاومت حاصل از پیچش متناظر با آن ۱۵۲/۴۳ نیوتن در متر می‌باشد. نتیجه آزمایش‌ها نشان می‌دهند که در ۲٪ میزان درصد ۱۰٪ و ۱۵٪ میکروسیلیس، اثرهای بهتری بر روی مقاومت فشاری بتن سبک‌دانه ساخته شده با اسکریا، نسبت به حالتی که از ۲۰٪ خاکستر بادی به عنوان ماده افزودنی معدنی در ساخت بتن به کار می‌رود، به دست می‌آید.

روش پیچش ۱۳۶/۷۵ نیوتن در متر حاصل شده است. یافته‌ها نشان می‌دهند که در هر ۳٪ میزان درصد ۵٪ و ۱۰٪ و ۱۵٪ میکروسیلیس، اثرهای بهتری بر روی مقاومت فشاری بتن سبک‌دانه ساخته شده با لیکا، نسبت به حالتی که از ۲۰٪ خاکستر بادی به عنوان ماده افزودنی معدنی در ساخت بتن استفاده می‌شود، به دست آمده است. مقدار مقاومت فشاری حاصل از ۱۰٪ و ۱۵٪ میکروسیلیس در نمونه‌های بتن سبک ساخته شده با لیکا، بسیار نزدیک و با اختلاف کمتر از ۱ مگا پاسکال می‌باشد. در مورد پرلیت، میزان مقاومت فشاری با استفاده از ۱۰٪ میکروسیلیس، ۲۲/۱۷ مگا پاسکال و مقاومت حاصل از پیچش متناظر با آن ۸۹/۶۷ نیوتن در متر می‌باشد. مشاهده می‌شود که در ۲٪ میزان درصد ۱۰٪ و ۱۵٪ میکروسیلیس، اثرهای بهتری بر روی مقاومت فشاری بتن سبک‌دانه

جدول ۱۰ نتیجه‌های بتن سبک‌دانه ساخته شده با لیکا با مواد افزودنی

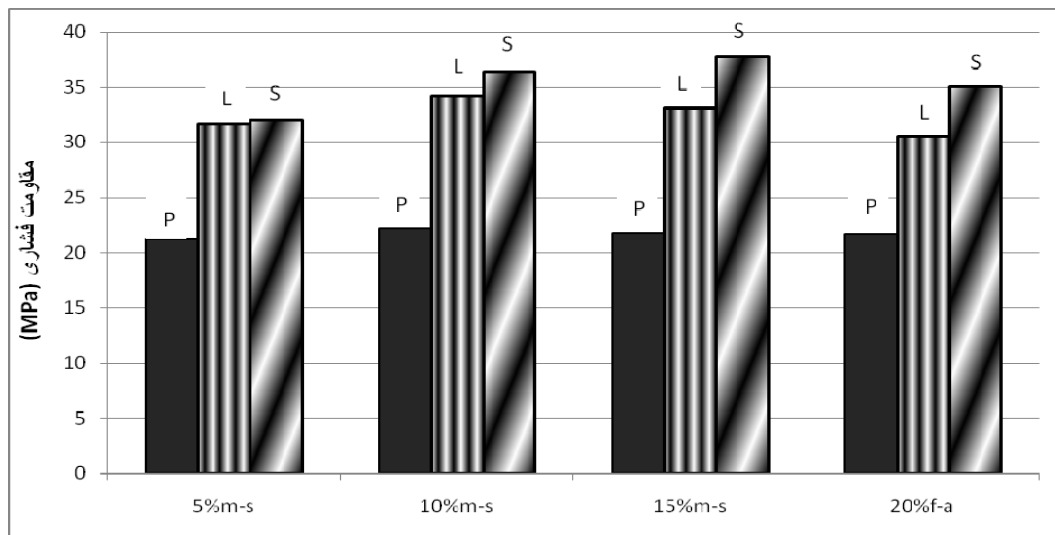
محدوده مقاومتی محاسباتی اولیه	مقاومت فشاری حاصل از روش مقاومت فشاری (MPa)	میانگین مقاومت فشاری حاصل از روش مقاومت فشاری (MPa)	وزن مخصوص (kg/m ³)	میانگین وزن مخصوص (kg/m ³)	مقاومت حاصل از روش پیچش برای ۳ وجه از ۱ نمونه (Nm)	میانگین مقاومت حاصل از روش پیچش (Nm)
بیش از ۳۰ مگا پاسکال ۵٪ میکروسیلیس	۳۱/۸	۳۱/۷	۱۸۲۱/۳	۱۸۲۹/۷۳	۱۱۴/۳۲	۱۱۸/۸۱
	۳۱/۱		۱۸۱۱/۵		۱۲۱/۰۵	
	۳۲/۲		۱۸۵۶/۴		۱۲۱/۰۵	
بیش از ۳۰ مگا پاسکال ۱۰٪ میکروسیلیس	۳۲/۳	۳۴/۲۳	۱۸۵۵/۳	۱۸۸۲/۸	۱۲۷/۷۸	۱۳۶/۷۵
	۳۴/۶		۱۸۹۱/۵		۱۴۷/۹۵	
	۳۵/۸		۱۹۰۱/۷		۱۳۴/۵	
بیش از ۳۰ مگا پاسکال ۱۵٪ میکروسیلیس	۳۱/۴	۳۳/۱	۱۸۴۲/۱	۱۸۷۴/۴۳	۱۲۱/۰۵	۱۲۵/۵۳
	۳۳/۷		۱۸۷۵/۶		۱۳۴/۵	
	۳۴/۲		۱۸۸۵/۴		۱۲۱/۰۵	
بیش از ۳۰ مگا پاسکال ۲۰٪ خاکستر بادی	۲۹/۴	۳۰/۵۶	۱۷۹۶/۴	۱۸۲۶/۲۳	۱۰۰/۸۸	۱۰۷/۶
	۳۰/۸		۱۸۲۳/۹		۱۰۷/۶	
	۳۱/۵		۱۸۵۸/۴		۱۱۴/۳۲	

جدول ۱۱ نتیجه‌ها برای بتن سبک‌دانه ساخته شده با پرلیت با افزودنی

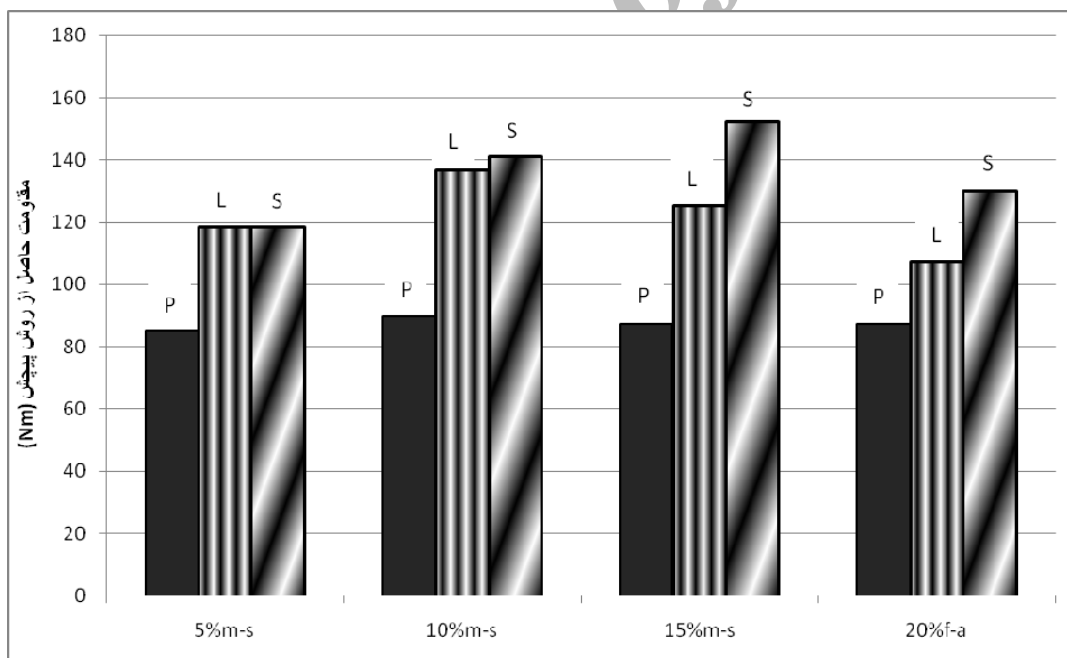
محدوده مقاومتی محاسباتی اولیه	مقاومت فشاری حاصل از روش مقاومت فشاری (MPa)	میانگین مقاومت فشاری حاصل از روش مقاومت فشاری (MPa)	وزن مخصوص (kg/m ³)	میانگین وزن مخصوص (kg/m ³)	مقاومت حاصل از روش پیچش برای ۳ وجه از ۱ نمونه (Nm)	میانگین مقاومت حاصل از روش پیچش (Nm)
بیش از ۲۰ مگاپاسکال / ۵٪ میکروسیلیس	۱۹/۳	۲۱/۲	۱۶۲۲/۱	۱۶۵۳/۵۷	۸۰/۷	۸۵/۱۸
	۲۲/۴				۸۷/۴۲	
	۲۱/۹				۸۷/۴۲	
بیش از ۲۰ مگاپاسکال / ۱۰٪ میکروسیلیس	۲۰/۹	۲۲/۱۷	۱۶۸۳/۵	۱۷۰۹/۰۷	۸۰/۷	۸۹/۶۷
	۲۲/۸				۹۴/۱۵	
	۲۲/۵				۹۴/۱۵	
بیش از ۲۰ مگاپاسکال / ۱۵٪ میکروسیلیس	۲۰/۴	۲۱/۸۳	۱۶۶۱/۳	۱۶۵۷/۷	۹۴/۱۵	۸۷/۴۲
	۲۲/۳				۸۰/۷	
	۲۲/۸				۸۷/۴۲	
بیش از ۲۰ مگاپاسکال / ۲۰٪ خاکستر بادی	۲۱/۳	۲۱/۷	۱۶۵۴/۵	۱۶۷۸/۵۳	۹۴/۱۵	۸۷/۴۲
	۲۲/۱				۹۴/۱۵	
	۱۹/۳				۸۰/۷	

جدول ۱۲ نتیجه‌ها برای بتن سبک‌دانه ساخته شده با اسکرپا با افزودنی

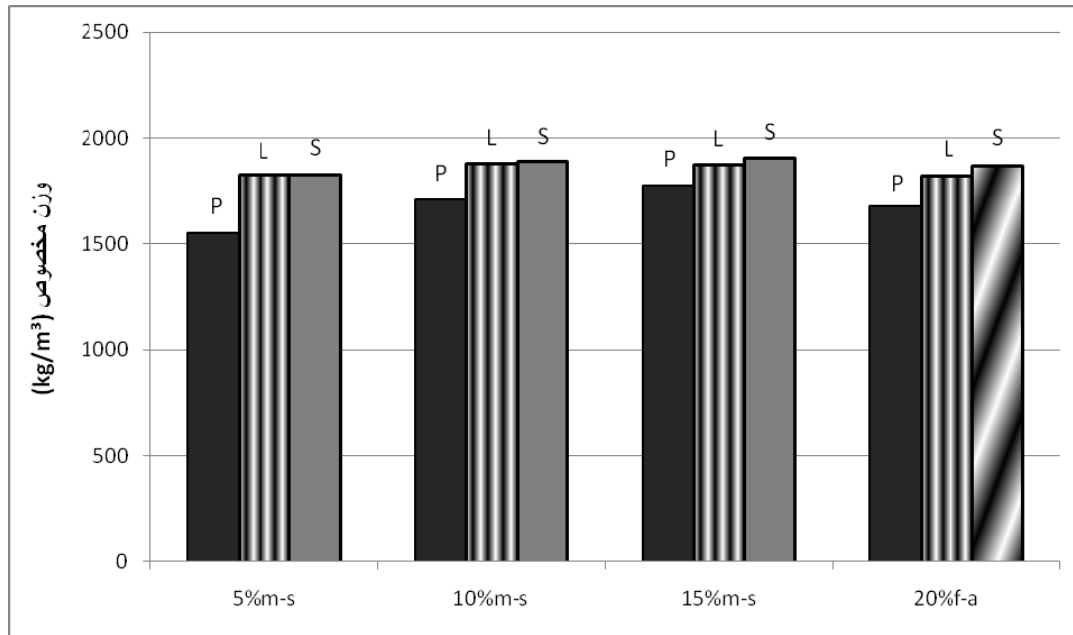
محدوده مقاومتی محاسباتی اولیه	مقاومت فشاری حاصل از روش مقاومت فشاری (MPa)	میانگین مقاومت فشاری حاصل از روش مقاومت فشاری (MPa)	وزن مخصوص (kg/m ³)	میانگین وزن مخصوص (kg/m ³)	مقاومت حاصل از روش پیچش برای ۳ وجه از ۱ نمونه (Nm)	میانگین مقاومت حاصل از روش پیچش (Nm)
بیش از ۳۰ مگاپاسکال / ۵٪ میکروسیلیس	۳۰/۴	۳۲/۰۳	۱۷۹۸/۳	۱۸۲۷/۹۳	۱۱۴/۳۲	۱۱۸/۸
	۳۲/۸				۱۲۱/۰۵	
	۳۲/۹				۱۲۱/۰۵	
بیش از ۳۰ مگاپاسکال / ۱۰٪ میکروسیلیس	۳۴/۶	۳۶/۴۷	۱۸۶۴/۶	۱۸۹۲/۲	۱۴۱/۲۲	۱۴۱/۲۳
	۳۷/۲				۱۴۷/۹۵	
	۳۷/۶				۱۳۴/۵	
بیش از ۳۰ مگاپاسکال / ۱۵٪ میکروسیلیس	۳۵/۳	۳۷/۷۷	۱۸۸۴/۶	۱۹۰۶/۷۷	۱۴۷/۹۵	۱۵۲/۴۳
	۳۸/۳				۱۴۷/۹۵	
	۳۹/۷				۱۶۱/۴	
بیش از ۳۰ مگاپاسکال / ۲۰٪ خاکستر بادی	۳۴/۳	۳۵/۱	۱۸۶۱/۴	۱۸۷۲/۱	۱۲۷/۷۸	۱۳۰/۰۲
	۳۵/۴				۱۳۴/۵	
	۳۵/۶				۱۲۷/۷۸	



شکل ۴ مقایسه ۳ بتن سبک‌دانه ساخته شده از پرلیت (P)، لیکا (L) و اسکریا (S) از نظر مقاومت فشاری با استفاده از ۵٪، ۱۰٪ و ۲۰٪ میکروسیلیس و ۲۰٪ خاکستر بادی

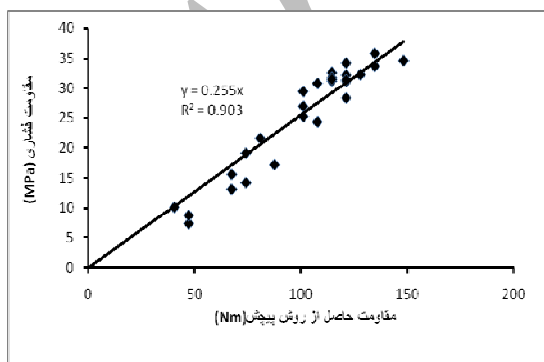


شکل ۵ مقایسه ۳ بتن سبک‌دانه ساخته شده از پرلیت (P)، لیکا (L) و اسکریا (S) از نظر مقاومت حاصل از روش پیچش با استفاده از ۵٪، ۱۰٪ و ۲۰٪ میکروسیلیس و ۲۰٪ خاکستر بادی



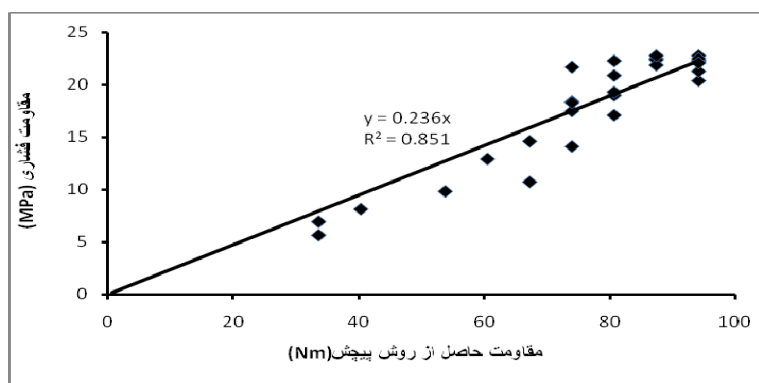
شکل ۶ مقایسه ۳ بتن سبک‌دانه ساخته شده از پرلیت (P)، لیکا (L) و اسکریا (S) از لحاظ وزن مخصوص با استفاده از ۵٪، ۱۰٪ و ۲۰٪ میکروسیلیس و ۲۰٪ خاکستریادی

چه به صورت درجا انجام شود، به راحتی اعداد حاصل از مقاومت حاصل از روش پیچش را با این منحنی‌های کالیبراسیون می‌توان به مقاومت فشاری بتن تبدیل نمود. در هر یک از منحنی‌های زیر معادله خط عبوری از مبدا مختصات و ضریب همبستگی بیان شده است.

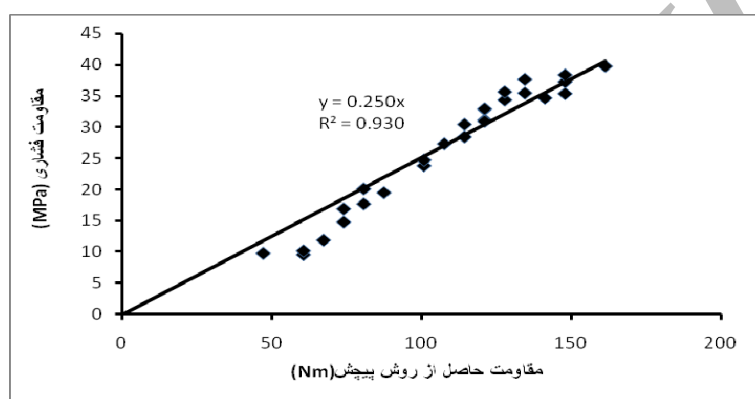


شکل ۷ منحنی همبستگی نتایج مقاومت حاصل از روش پیچش و مقاومت فشاری برای بتن تولید شده با لیکا

منحنی‌های واسنجی (Calibration) میان دو عامل مقاومت فشاری و مقاومت حاصل از روش پیچش برای هر یک از سبک‌دانه‌های لیکا، اسکریا و پرلیت در اشکال ۷، ۸ و ۹ ارائه گردیده است. نتایج حاصل از تحلیل آماری نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد که ضریب همبستگی خطی مابین دو عامل مقاومت فشاری و مقاومت حاصل از روش پیچش برای بتن‌های سبک‌دانه ساخته شده با لیکا ۰/۹۰۴، برای بتن‌های سبک‌دانه ساخته با اسکریا ۰/۹۳۱ و برای بتن‌های سبک‌دانه با پرلیت ۰/۸۵۱ می‌باشد. روابط تقریباً خطی مابین این دو عامل با توجه به ضرابی که گزارش شد، وجود دارد و با توجه به منحنی‌های کالیبراسیون حاصله بین دو عامل بیان شده، این نتیجه حاصل می‌شود که در مورد بتن‌های سبک‌دانه ساخته شده با این ۳ سبک‌دانه، چنانچه آزمون پیچش که تست بسیار ساده‌ای است، چه به صورت آزمایشگاهی و



شکل ۸ نمودار همبستگی نتیجه‌های مقاومت حاصل از روش پیچش و مقاومت فشاری برای بتن تولید شده با پرلیت



شکل ۹ نمودار همبستگی نتیجه‌های مقاومت حاصل از روش پیچش و مقاومت فشاری برای بتن تولید شده با اسکریا

نتیجه گیری

نتیجه‌ها در زمان ساخت به نسبت بیشتر بوده و با توجه به این موضوع، مقاومت فشاری کمی بیش از ۲۰ مگاپاسکال برای این سبک‌دانه حاصل شده است. ۲- در استفاده از مواد افزودنی معدنی در هر ۳ الگوبتن سبک‌دانه ساخته شده با لیکا، اسکریا و پرلیت، بیشترین مقدار مقاومت فشاری و متناظر با آن مقاومت حاصل از روش پیچش در مورد سبک‌دانه اسکریا و سپس سبک‌دانه لیکا و در آخر بتن سبک‌دانه ساخته با پرلیت میباشد. در بررسی بتن سبک‌دانه ساخته شده با لیکا و همچنین پرلیت این نتیجه حاصل می‌شود که استفاده از میکروسیلیس تا ۱۰٪ وزن مصالح سیمانی، روند رو به رشدی در مقاومت فشاری و متناظر با آن، مقاومت حاصل از روش پیچش حاصل می‌گرداند. اما با استفاده از ۱۵٪ میکروسیلیس در این دو الگوبتن، مقدار مقاومت

۱- با توجه به نتیجه‌های به‌دست آمده برای سه بتن سبک‌دانه ساخته شده با لیکا و پرلیت و اسکریا در شرایط طرح اختلاطی به نسبت مشابه از نظر نسبت حجمی، این نتیجه حاصل می‌شود که سبک‌دانه اسکریا با توجه به وزن مخصوص دانه‌ای بیشتر نسبت به لیکا و پرلیت، در شرایط مشابه، دارای مقاومت فشاری و متناظر با آن مقاومت حاصل از روش پیچش و وزن مخصوص بیشتری بوده و بدون استفاده از مواد افزودنی معدنی به راحتی در دسته بتن‌های سبک سازه‌ای قرار می‌گیرد. در مورد بتن سبک ساخته شده با لیکا نیز این نتیجه حاصل شده است که این سبک‌دانه نیز می‌تواند بدون استفاده از مواد افزودنی معدنی، بتن سبک با مقدار مقاومت لازم سازه‌ای را فراهم کند. ولی در مورد پرلیت پراکنندگی

با لیکا باعث رشد ۵٪ مقاومت فشاری نمونه ها و در بتن سبک‌دانه ساخته شده با پرلیت باعث رشد ۶/۹٪ مقاومت فشاری نمونه ها می شود.

۴- با توجه به کالیبره نمودن نتایج و حصول نمودارهای کالیبراسیون بین دو عامل مقاومت فشاری و مقاومت حاصل از روش پیچش برای هر یک از سبک‌دانه ها، ضریب تبدیل مقدارمقاومت حاصل از روش پیچش به مقاومت فشاری در منحنی کالیبراسیون لیکا ۰/۲۵۲، در منحنی کالیبراسیون اسکریا ۰/۲۳۹ و در منحنی کالیبراسیون پرلیت ۰/۲۴۱ گزارش شده است. از اینرو میتوان با اعمال روش پیچش در هر مکانی در مورد هر یک از ۳ بتن سبک ذکر شده، مقدار مقاومت فشاری هر کدام از این ۳ بتن سبک‌دانه را با کمک نمودارهای کالیبراسیون مربوطه تعیین نمود. بیشترین همبستگی نتایج بین دو عامل مقاومت فشاری و مقاومت حاصل از روش پیچش، برای بتن سبک‌دانه ساخته شده با اسکریا و کمترین میزان همبستگی نتایج بین این دو عامل برای بتن سبک‌دانه ساخته شده با پرلیت می باشد.

۵- همان طور که از نتایج حاصل شده است، به راحتی می توان از بتن سبک‌دانه ساخته شده با اسکریا و لیکا حتی بدون مواد افزودنی معدنی در فرآیند کاربردی بتن سازه ای استفاده نمود. به طوریکه با استفاده از مواد افزودنی معدنی مثل میکروسیلیس خواص مطلوب تر مقاومتی در بتنهای سبک ساخته شده با اسکریا و لیکا حاصل می گردد. همچنین با کمک مواد افزودنی معدنی مانند میکروسیلیس در بتن سبک ساخته شده با پرلیت، بتن سبک با کارائی نیمه سازه‌ای و حتی سازه‌ای با مقاومت در حدود ۲۰ مگاپاسکال حاصل شده است.

فشاری تغییر محسوسی نداشته و تقریباً مقدار مقاومت فشاری یکسانی را در قیاس با ۱۰٪ میکروسیلیس، به همراه دارد. اما در مورد بتن ساخته شده با اسکریا، روند صعودی مقاومت فشاری و متناظر با آن، مقاومت حاصل از روش پیچش تا هنگامی که ۱۵٪ میکروسیلیس به عنوان ماده افزودنی معدنی در بتن استفاده شود، وجود دارد. آنچه که مشخص است استفاده حتی ۱۰٪ میکروسیلیس به عنوان ماده افزودنی معدنی اثرات بهتری در روند افزایش مقاومت فشاری در هر ۳ الگویتن سبک‌دانه ساخته شده با اسکریا، لیکا و پرلیت نسبت به استفاده از ۲۰٪ خاکستر بادی به عنوان ماده افزودنی معدنی داراست. از اینرو پیشنهاد می شود که از میکرو سیلیس به عنوان ماده افزودنی جهت افزایش مقاومت فشاری در قیاس با خاکستر بادی در ساخت بتن های سبک‌دانه استفاده شود.

۳- در نتایج بدست آمده مشاهده می شود که استفاده از میکروسیلیس با درصدهای مختلف ۵٪، ۱۰٪ و ۱۵٪ در هر یک از بتن های سبک‌دانه ساخته شده با اسکریا، لیکا و پرلیت مقاومت فشاری نمونه بتنی را افزایش می‌دهد. این مقدار افزایش در بتن سبک‌دانه ساخته شده با اسکریا بین ۲٪ تا ۳/۲۰٪، در بتن سبک‌دانه ساخته شده با لیکا بین ۸/۹٪ تا ۱۷/۶٪ درصد و برای بتن سبک‌دانه ساخته شده با پرلیت بین ۴/۵٪ تا ۹/۲٪ می باشد. همچنین استفاده از ۲۰٪ خاکستر بادی به عنوان ماده افزودنی معدنی، باعث افزایش مقاومت فشاری و متناظر با آن لنگر حاصل از روش پیچش در هر نمونه مکعبی بتنی می شود. استفاده از ۲۰٪ خاکستر بادی در بتن سبک‌دانه ساخته شده با اسکریا، باعث رشد ۱۱/۸٪ مقاومت فشاری نمونه ها، در بتن سبک‌دانه ساخته شده

مراجع

1. Spitzer J. "A Review of the Development of Lightweight Aggregate, History & Actual Survey", *Proc, Int, Symp, Structural Lightweight Concrete*, Norway; pp. 13-21, (1995).
2. handaker M, and Hossain A., "Properties of Volcanic Pumice Based Cement and Lightweight

- Concrete", Department of Civil Engineering, Ryerson University; (2006).
3. Imura, S, Kaniva, H, Horio M, and Kimura, K., "A Novel Fluidized Bed Manufacturing of High Performance Artificial Lightweight Aggregate Concrete", Kristiansand, Norway; pp. 611-613, (2000).
 4. STM-C332, Standard Specification for Lightweight Aggregate for Insulating Concrete, American Society of Testing Material; (1999).
 5. Rogheh Satah JO. Evaluation of Lightweight Concrete Mixtures for Bridge Deck and Prestressed Bridge Girder Applications, Thesis for The Degree Master of Science, Department of Civil Engineering, Kansas State University; (2006).
 6. STM-C330, Specification for Lightweight Aggregates for Structural Concrete, American Society of Testing Material; (2004).
 7. STM-C33, Standard Specification for Concrete Aggregates, American Society of Testing Material; (2000).
 8. CI-211.2 Standard Practice for Selecting Proportion for Structural Lightweight Concrete, American Concrete Institute; (1998).
 9. STM-C150/150M, Standard Specification for Portland Cement, American Society of Testing Material; (2009).
 10. TM-C1240, Standard Specification for Silica Fume for Use as a Mineral Admixture in Hydraulic Cement Concrete, American Society of Testing Material; (1997).
 11. I-211.1R, Guide for Use of Admixtures in Concrete, part 1: Material and General Properties of Concrete, American Concrete Institute; (1984).
 12. I-212.4R, Guide for the Use of High-Range Water-Reducing Admixtures (Superplasticizers) in Concrete, American Concrete Institute; (2004).
 13. TM-C192/192M, Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory, American Society of Testing Material; (2007).
 14. TM-C567, Standard Test Method for Determining Density of Structural Lightweight Concrete, American Society of Testing Material; (2000).
 15. ACI-318, Building Code Requirements for Structural Concrete, Part 1-3, Manual of Concrete Practice, American Concrete Institute; (2005).
 16. Naderi M. New Twist-off Method for the Evaluation of In-Situ Strength of Concrete, ASTM Journal of Testing and Evaluation, Volume 35, Issue 6; (2007).

۱۷. نادری، محمود، "روشهای بهبود و تعیین آزمایشگاهی و درجای مقاومت بتن"، انتشارات روزبهان، تهران، (۱۳۸۸)، صفحات ۱۴۳ تا ۱۸۷.