

بررسی خصوصیات مکانیکی بتن سبک سازه‌ای

علی‌رضا انتظاری^۱ و جمشید اسماعیلی*^۲

^۱ دانشجوی دوره دکتری، دانشکده فنی - مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

^۲ استادیار دانشکده فنی - مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

چکیده

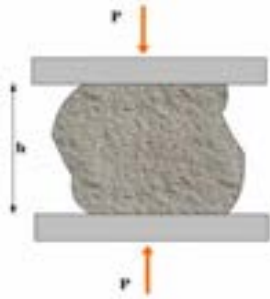
در این تحقیق خصوصیات بتن سبک (LWAC) سازه‌ای ساخته شده با مصالح سبک منطقه آذربایجان - ایران بررسی شده است. با توجه به اینکه ایران منطقه زلزله‌خیز می‌باشد سبک سازی ساختمان‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. یکی از روش‌ها برای کاهش تأثیر زلزله روی سازه‌ها کاهش وزن ساختمان با استفاده از مصالح سبک می‌باشد. در این تحقیق از دو نوع مختلف سنگدانه سبک اسکوریا و پومیس که از منطقه آذربایجان ایران تهیه شده بود برای مخلوط‌های بتن استفاده شد. خصوصیات مکانیکی بتن سبک نظیر مقاومت فشاری، مقاومت کششی، مدول گسیختگی، مدول الاستیسیته و رفتار تنش - کرنش مورد مطالعه قرار گرفته است. بر خلاف بتن معمولی (NWC)، نتایج نشان داده است که در شرایط مقاومت یکسان، مقاومت سنگدانه بیشتر به عنوان عامل اصلی تعیین کننده مقاومت بتن سبک می‌باشد. در این تحقیق از ۲۷ مخلوط بتن سبک با مقاومت فشاری ۲۸ روزه متفاوت تا ۲۴ تا ۵۱ مگاپاسگال استفاده شده و مقاومت فشاری، مقاومت کششی، مدول گسیختگی، مدول الاستیسیته و کرنش متناظر با تنش حداکثر آنها اندازه‌گیری و با بتن معمولی مقایسه شده است. مشخص شد برای مقاومت فشاری یکسان (۵۱-۲۴ Mpa) مدول الاستیسیته بتن سبک (۱۸/۷۷Gpa-۱۰/۹۲) کمتر از بتن معمولی (۲۸/۳۱Gpa-۱۷/۵۳) است و مقاومت کششی و مدول گسیختگی بتن سبک نیز کمتر از بتن معمولی تعیین شد. کرنش متناظر با تنش حداکثر در بتن سبک در محدوده ۰/۰۰۳۷۸-۰/۰۰۲۵۵ قرار داشت در حالی که در بتن معمولی در شرایط مقاومت یکسان در محدوده ۰/۰۰۳۴۱-۰/۰۰۲۲۸ قرار دارد، این موضوع کم بودن مقدار مدول الاستیسیته بتن سبک را در مقایسه با بتن معمولی نشان می‌دهد. **واژگان کلیدی:** اسکوریا، بتن سبک، پومیس، خصوصیات مکانیکی، سنگدانه.

۱- مقدمه

تشکیل می‌دهند و به علت اینکه نسبت حجمی بیشتری را اشغال می‌کنند، تأثیر بیشتری روی خصوصیات مکانیکی بتن دارند [۳]. از آنجا که اثر و نقش خمیر سیمان و سنگدانه سبک در بتن سبک در مقایسه با بتن معمولی متفاوت است، بنابر این در بتن سبک شناسایی خصوصیات مکانیکی سنگدانه‌های سبک اهمیت ویژه‌ای خواهد داشت. سنگدانه‌های سبک از لحاظ فرایند تولید به دوصورت طبیعی و مصنوعی تقسیم می‌شوند که در مورد سنگدانه‌های طبیعی که منشاء آتشفشانی دارند می‌توان به سنگدانه پومیس (پوکه سنگ) و سنگدانه اسکوریا (سنگ پا) اشاره کرد. این نوع مصالح تنها بعد از عملیات مکانیکی نظیر خرد کردن و دانه‌بندی مورد استفاده قرار می‌گیرند. سنگدانه‌های با منشاء آتشفشانی با آزاد سازی گازها در مرحله انجاماد تولید می‌شوند. ساختار سلولی پومیس با شکل‌گیری حباب‌ها یا حفره‌های هوا تولید می‌شود. موقعی که گازها به همراه گدازه از آتشفشان خارج می‌شوند حفره‌های هوا موقع سرد شدن در درون گدازه محبوس می‌شوند. با سرد شدن ناگهانی ماگمای مذاب، بلوری شدن رخ نداده و ماده، ساختار شیشه‌ای خواهد یافت. گدازه‌های مواد مذاب که حاوی گاز و هوا

در سال‌های اخیر بتن با سنگدانه‌های سبک به صورت موفقیت‌آمیز در اهداف سازه‌ای مورد استفاده قرار گرفته است [۱]. در بتن سبک سازه‌ای تعیین نسبت مقاومت فشاری تک محوری به وزن مخصوص بتن از اهمیت بیشتری برخوردار است. به علت اثرات نسبت مقاومت فشاری به وزن مخصوص در تعیین ابعاد سازه‌ای، افزایش این نسبت موثرتر خواهد بود. دامنه وزن مخصوص بتن سبک سازه‌ای تقریباً بین $1200-2000 \text{ kg/m}^3$ بوده در حالی که بتن معمولی بین $2300-2500 \text{ kg/m}^3$ می‌باشد. براساس آیین‌نامه ACI-213 [۲] بتن سبک سازه‌ای بتنی است که حداقل مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه استوانه‌ای 17 Mpa و وزن مخصوص بین $1920-1120 \text{ kg/m}^3$ داشته باشد. همچنین چگالی توده‌ی آن از 1120 kg/m^3 برای ریزدانه سبک و 880 kg/m^3 برای درشت دانه سبک تجاوز نکند و برای ساخت آن، استفاده از سنگدانه سبک یا ترکیبی از سنگدانه سبک و معمولی مجاز است. طرح اختلاط بتن سبک برای کاربردهای سازه‌ای بسیار پیچیده است زیرا به نوع سنگدانه سبک بستگی دارد. عموماً سنگدانه‌ها، ۷۰ تا ۸۰٪ حجم بتن را

در این رابطه P حداکثر بار وارده به سنگدانه و h ارتفاع ما بین دو نقطه اثر نیرو است. V حجم سنگدانه بوده که با آزمایش ازشمیدس تعیین می‌شود (شکل (۱)). در این روش دو لبه انتهایی سنگدانه به وسیله اهر الماسی طوری برش داده می‌شوند که دو لبه نسبت به هم موازی باشند. آیین‌نامه‌ها و محققان، معادلات متفاوتی را برای ارتباط مقاومت فشاری با مقاومت کشش شکاف خوردگی، مدول گسیختگی، مدول الاستیسیته و کرنش متناظر با تنش حداکثر بتن ارائه نموده‌اند که به صورت اختصار در جدول (۱) درج شده است.



شکل ۱- مدل آزمایش تعیین مقاومت فشاری سنگدانه سبک

برای کاربردهای سازه‌ای بتن سبک، اطلاعات مربوط به خصوصیات مکانیکی بتن اهمیت بسیاری دارد. تحقیقات نشان می‌دهد که خصوصیات مکانیکی بتن سبک در مقایسه با بتن معمولی با شرایط مقاومتی یکسان، متفاوت است. در این تحقیق اطلاعات و روابط جدید مقاومت فشاری، مقاومت کششی، مدول گسیختگی، مدول الاستیسیته و کرنش بتن ساخته شده با سنگدانه‌های سبک طبیعی موجود در منطقه آذربایجان - ایران مورد بررسی قرار می‌گیرد.

هستند هنگام سرد شدن، به صورت یک ماده متخلخل اسفنجی منجمد بوجود می‌آیند [۴]. پومیس به حد زیاد بافت سلولی داشته و شبیه عناصر اصلی ریولیت (نوعی سنگ آتشفشانی دانه ریز) می‌باشد. عموماً اسکوریا از نظر شکل نامنظم بوده و عناصر اصلی بازالت را دارد. اسکوریا سنگین‌تر، تیره‌تر و کریستالی‌تر از پومیس است. رنگ اسکوریا مایل به قرمز یا سیاه است [۵].

خصوصیات سنگدانه‌ها به دو ویژگی بیرونی (بزرگترین اندازه، شکل و بافت سطحی دانه) و داخلی (مقاومت، چگالی، تخلخل، سختی، مدول الاستیسیته، ترکیبات شیمیایی و غیره) تقسیم می‌شوند. حداکثر اندازه سنگدانه کوچکتر، مقاومت بالاتری را برای بتن ایجاد می‌کند و شکل دانه و بافت سطحی دانه‌ها روی کارایی بتن تازه و مقاومت اثر می‌گذارند. سنگدانه‌های سبک که در خمیر سیمان قرار می‌گیرند، به علت منفذهای سطحی دانه‌ها، قفل و بست را بهبود می‌دهند. بعلاوه سنگدانه سبک با دانه‌هایی با شکل نامنظم شرایط بهتری را از لحاظ مقاومت چسبندگی نسبت به سنگدانه سبک با دانه‌های گرد که از لحاظ بافت سطحی شرایط یکسانی را دارند ایجاد می‌کند.

هم‌اکنون آیین‌نامه استاندارد در تعیین مستقیم مقاومت سنگدانه وجود ندارد. عموماً مقاومت سنگدانه بطور ضمنی با آزمایش‌های شناخته شده‌ای نظیر سایش لوس آنجلس (ASTM C۱۳۱)، آزمایش سختی، آزمایش ذوب انجماد (ASTM C۸۸) و میزان خرد شدگی سنگدانه ارزیابی می‌شود. Su و Chang [۶] با استفاده از علم مکانیک دانه‌ای، رابطه ساده‌ای را برای تخمین مقاومت فشاری سنگدانه درشت (σ) ارائه نموده‌اند:

$$\sigma = \frac{1}{V} P.h \quad (۱)$$

جدول ۱- روابط ارائه شده بین مقاومت کششی، مدول گسیختگی، مدول الاستیسیته و کرنش با مقاومت فشاری بتن سبک توسط محققین مختلف

پیشنهاد دهنده	مقاومت کشش شکاف خوردگی (Mpa)	مدول گسیختگی (Mpa)	مدول الاستیسیته (Mpa)	کرنش متناظر با تنش حداکثر
Zhang و Gjorv [۱]	$f_{ct} = 0.23\sqrt{f_{ck}^2}$	$f_r = 0.73\sqrt{f_{ck}}$	$E_c = 1.19\sqrt{f_{ck}^2}$	
ACI 318-05 [۷]	$f_{ct} = \lambda(0.55\sqrt{f_c'})$	$f_r = \lambda(0.623\sqrt{f_c'})$	$E_c = 0.043w_c^{1.5}\sqrt{f_c'}$	
Tasnimi [۸]			$E_c = 2.1684f_c'^{0.535}$	$\epsilon_o = (70f_c'^{0.44} - 15) \times 10^{-5}$
Wang et al. [۹]			$E_c = 2.1684f_c'^{0.535}$	
Almusallam و Alsayed [۱۰]				$\epsilon_o = (65.5f_c'^{0.44} - 6.75) \times 10^{-5}$
Slate et al. [۱۱]	$f_{ct} = 0.415\sqrt{f_c'}$	$f_r = 0.54\sqrt{f_c'}$	$E_c = (3320\sqrt{f_c'} + 6900)\left(\frac{w_c}{2300}\right)^{1.5}$	
FIP [۱۲]		$f_r = 0.30(f_c')^{\frac{2}{3}}$		
CEB [۱۳]			$E_c = 9500(f_c')^{\frac{1}{3}}\left(\frac{w_c}{2400}\right)^2$	

برای بتن که تنها از ماسه سبک استفاده شده $\lambda = 0.85$ و در بتن با شن و ماسه سبک $\lambda = 0.75$ است.

f_{ck} (Mpa) مقاومت فشاری نمونه استوانه‌ای (Mpa) $100 \times 100 \times 100$ mm و w_c وزن مخصوص بتن خشک شده (kg/m^3) می‌باشد.

۲- مواد و روش‌ها

۱-۲- مواد

۱-۱-۲- سیمان

سیمان استفاده شده در تهیه کلیه نمونه‌ها، سیمان پرتلند نوع II (PC) با چگالی ۳/۱۵ و نرمی $293 \text{ m}^2/\text{kg}$ می‌باشد. مقاومت ۲۸ روزه نمونه مکعبی ۵۰ میلی‌متری ساخته شده با سیمان، $39/3 \text{ Mpa}$ و زمان گیرش اولیه ۷۰ دقیقه و نهایی ۴ ساعت و ۳ دقیقه تعیین شده‌اند. ترکیبات شیمیایی سیمان در جدول (۲) ارائه شده است.

۲-۱-۲- میکروسیلیس

در این تحقیق از میکروسیلیس که با استاندارد ASTM C1240 مطابقت دارد به عنوان ماده افزودنی استفاده شده است. وزن مخصوص انبوهی میکروسیلیس 500 kg/m^3 است. ترکیبات شیمیایی آن در جدول (۲) درج شده است. افزودنی‌های معدنی نظیر میکروسیلیس، تخلخل بتن را کاهش داده و موجب بهبود ناحیه مرزی می‌شوند. میکروسیلیس پودری است به رنگ خاکستری روشن یا تیره که حاوی حدود ۹۴-۹۶٪ دی‌اکسید سیلیسیم (SiO_2) می‌باشد که از فرآیند تولید فروسیلیس در کوره‌های قوس الکتریکی به دست می‌آید. میکروسیلیس خاصیت جذب آب دارد، بنابراین باید به همراه مواد فوق روان کننده مورد استفاده قرار گیرد.

۳-۱-۲- فوق روان کننده

در این تحقیق از فوق روان کننده معمولی مطابق با آیین‌نامه ASTM C494 به میزان ۱/۵-۰/۸ درصد وزن سیمان استفاده شد. چگالی ویژه فوق روان کننده $1/21 \text{ g/cm}^3$ اعلام شده است. برای کسب مقاومت فشاری بیشتر در بتن، باید آب بتن کاهش داده شود. با استفاده از فوق روان کننده می‌توان با حفظ کارایی بتن مقدار آب آن را کاهش داد.

۴-۱-۲- سنگدانه‌های سبک

سنگدانه پومیس (شکل (۲)) از معدن طبیعی اسکندران در نزدیکی تبریز (آذربایجان شرقی - ایران) و سنگدانه اسکوریا (شکل (۳)) از معدن طبیعی آجواج در نزدیکی سلماس (آذربایجان غربی - ایران) تهیه شدند. در این تحقیق اندازه بزرگترین سنگدانه سبک که در تهیه بتن استفاده شد 512 mm بود. تجزیه شیمیایی سنگدانه‌های پومیس و اسکوریا توسط شرکت‌های تولید کننده محصول انجام شده بود. نتایج مشخصات شیمیایی پومیس و اسکوریا و مقایسه آن با سیمان و میکروسیلیس در جدول (۱) ارائه شده است. تجزیه شیمیایی نشان می‌دهد که پومیس و اسکوریا عمدتاً از سیلیس (SiO_2) تشکیل شده است، در حالی که ماده اصلی سیمان، اکسید کلسیم (CaO) است. در پومیس و اسکوریا حدود ۲۸-۲۳٪ اکسید کلسیم، آلومین (Al_2O_3) و اکسید آهن (Fe_2O_3) وجود دارد. مقدار اکسیدهای سدیم (Na_2O) و پتاسیم (K_2O)، که خاصیت قلیایی دارند، در پومیس و SA (۷-۴٪) بیش از PC (۱/۳۲٪) می‌باشد.

جدول ۲- تجزیه شیمیایی مصالح مصرفی (درصد اکسیدها)

نوع اکسید	سیمان (PC)		میکروسیلیس (SF)	سنگدانه اسکوریا (SA)	سنگدانه پومیس (پومیس)
	درشت	ریز			
سیاه	۶۲/۷۷	۵۹/۱۴	۹۵/۵	۲۱/۴۵	SiO_2
قرمز	۱۷/۱۳	۱۵/۵۷	۱/۳۲	۴/۸۸	Al_2O_3
	۴/۴۸	۶/۶۸	۰/۸۷	۳/۵۸	Fe_2O_3
	۴/۹۰	۵/۴۷	۰/۴۹	۶۴/۳۳	CaO
	۳/۳۲	۳/۶۵	۰/۳۱	۰/۴۱	Na_2O
	۱/۱۱	۲/۹۷	۰/۹۷	۱/۷۵	MgO
	۱/۴۴	۲/۹۲	۱/۰۱	۰/۹۱	K_2O
-	-	-	۰/۱	۱/۹۴	SO_3
-	-	۱/۰۷	-	-	TiO_2
-	-	۰/۱۲	-	-	MnO
	۱/۸۸	۱/۷۹	-	۰/۶۲	L.O.I

انتخاب شد. در این تحقیق، ۳۳ مخلوط بتن سبک برای تعیین مقاومت فشاری، کشش شکاف خوردگی، مدول گسیختگی، مدول الاستیسیته و کرنش متناظر با تنش حداکثر مورد آزمایش قرارگرفت (جدول (۵)). میزان سیمان بتن از ۴۳۲ تا ۵۰۳ کیلوگرم در مترمکعب متغیر بوده و از میکروسلیس حداکثر به میزان ۱۰٪ وزن سیمان به صورت جایگزین سیمان استفاده شد. نسبت W/C بین ۰/۲۷ تا ۰/۳۷ متغیر بود که در آن W مقدار آب آزاد و فوق روان کننده و C میزان مواد سیمانی می‌باشند.

در مخلوط‌های S14 تا S19، PV و P8 تنها از ریزدانه سبک استفاده شده است. در کلیه مخلوط‌ها، سنگدانه‌های درشت از نوع سبک بودند. در طرح اختلاط بتن سبک از توصیه‌های مندرج در آیین‌نامه ACI 211 [۱۴] استفاده شد. برای تمامی مخلوط‌ها، بزرگترین اندازه سنگدانه، ۱۲/۵ میلیمتر در نظر گرفته شده است. جهت جلوگیری از افت سریع اسلامپ، سنگدانه‌های سبک از قبل به مدت ۳۰ دقیقه در آب اشباع شدند و بعد از بیرون آوردن از آب در یک ظرف مشبک نظیر سرنده ریخته شدند تا آب اضافی از سطح سنگدانه‌ها جدا شود. سپس سنگدانه‌های ریز به سنگدانه‌های سبک اضافه شده و در دستگاه مخلوط‌کن به مدت ۵ دقیقه کاملاً باهم مخلوط شدند. آنگاه سیمان و میکروسلیس به آنها اضافه گردید و مجدداً تمام اجزای تشکیل دهنده بتن با هم مخلوط شدند. در انتها آب لازم و فوق روان کننده به مصالح افزوده و به مدت ۵ دقیقه کل مصالح به هم زده شدند تا بتن به صورت همگن ایجاد شود.



شکل ۲- سنگدانه پومیس



شکل ۳- سنگدانه اسکوریا

۲-۲- برنامه آزمایشگاهی

برای نمونه‌برداری، دانه‌بندی، کنترل محدوده استاندارد (جدول (۳)) و تعیین وزن مخصوص سنگدانه‌ها به ترتیب طبق ASTM C۲۹، ASTM C۳۳۰، ASTM C۱۳۶، ASTM D۷۵ عمل شد. در تهیه بتن با ریزدانه سبک اسکوریا، بزرگترین اندازه دانه، شماره ۴ انتخاب شد. برای تعیین جذب آب سنگدانه‌های سبک و معمولی از آیین‌نامه ASTM C۱۲۷ استفاده شد. میزان جذب آب سنگدانه‌هایی که در این تحقیق استفاده شده در جدول (۴) ارائه شده است. در تعیین مقاومت فشاری دانه‌ای سنگدانه‌های اسکوریا و پومیس طبق روش پیشنهادی Chang و Su [۶] عمل شد. از هر نوع سنگدانه، ۵۰ دانه بصورت تصادفی

جدول ۳- دانه‌بندی سنگدانه‌های سبک و معمولی (درصد وزنی رد شده از الک)

اندازه الک	سنگدانه درشت			سنگدانه ریز		
	سبک‌دانه (۱۲/۵mm)		معمولی	سبک‌دانه		معمولی
	محدوده پیشنهادی ASTM	پومیس (PA)	اسکوریا (SA)	محدوده پیشنهادی ASTM	اسکوریا (SA)	محدوده پیشنهادی ASTM
۱	-	-	-	۱۰۰		
۳/۴	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۶۱		
۱/۲	۹۰-۱۰۰	۸۱	۹۹	۲۶		
۳/۸	۴۰-۸۰	۵۰	۷۶	۷	۱۰۰	۱۰۰
۴	۰-۲۰	۵	۷	۰	۱۰۰	۹۵-۱۰۰
۸		۰	۰		۶۶	۸۰-۱۰۰
۱۶					۳۳	۵۰-۸۵
۳۰					۱۹	-
۵۰					۱۵	۲۵-۶۰
۱۰۰					۱۰	۱۰-۳۰
۲۰۰					۰	۲-۱۰

جدول ۴- مشخصات سنگدانه‌ها

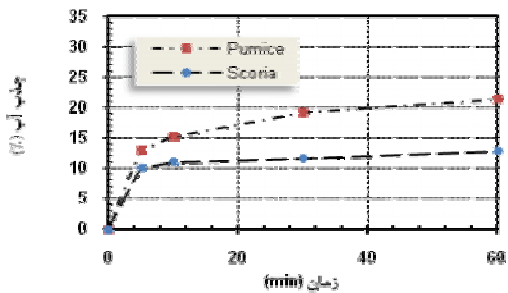
مقاومت فشاری (MPa) دانه	جذب آب (%)		چگالی		چگالی توده‌ای (Kg/m ³)		مصالح
	۲۴ ساعت	۳۰ دقیقه	خشک (OD)	اشباع با سطح خشک (SSD)	غیرمتراکم	متراکم	
۶/۷۲	۱۴/۸۴	۱۱/۶۳	۱/۶۰	۱/۸۴	۸۹۵	۹۹۵	سنگدانه درشت اسکوریا (SA)
۵/۰۵	۲۷/۸۴	۱۹/۱۰	۱/۱۷	۱/۳۸	۷۶۸	۸۲۹	سنگدانه درشت پومیس (PA)
	۱/۲۰		۲/۲۹	۲/۳۸			شن
	۱۳/۶۵		۱/۵۲	۱/۷۲			سنگدانه ریز اسکوریا (SA)
	۳/۴۴		۲/۳۵	۲/۴۸			ماسه

جدول ۵- مقادیر اجزای تشکیل دهنده مخلوط‌های بتن سبک (Kg/m³)

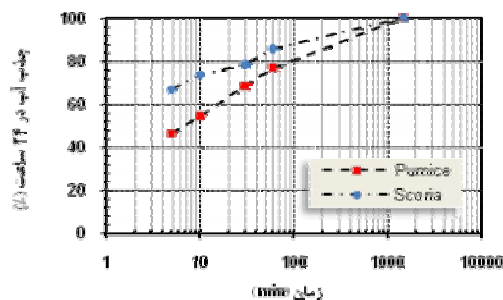
اسلامپ (mm)	نسبت آب به سیمان	فوق روان کننده	سنگدانه ریز		سنگدانه درشت		میکروسیلیس	سیمان	شماره نمونه	
			ماسه	سبک		سبک				
				پومیس	اسکوریا	پومیس				اسکوریا
۴۸	۰/۳۱	۷/۲	۷۰۰			۶۸۵	۴۸	۴۳۲	S1	
۶۵	۰/۳۳	۷/۲	۷۰۰			۶۸۵	۴۸	۴۳۲	S2	
۷۰	۰/۳۵	۷/۲	۷۰۰			۶۸۵	۴۸	۴۳۲	S3	
۴۵	۰/۲۹	۷/۲	۷۰۰			۶۸۵	۴۸	۴۳۲	S4	
۵۲	۰/۳۳	۷/۲	۷۰۰			۶۸۵	۴۸	۵۰۳	S5	
۶۲	۰/۳۴	۷/۲	۷۰۰			۶۸۵	۴۸	۵۰۳	S6	
۶۵	۰/۳۶	۷/۲	۷۰۰			۶۸۵	۴۸	۵۰۳	S7	
۷۱	۰/۳۵	۷/۶	۶۵۳			۷۰۰	۵۱	۴۵۶	S8	
۷۵	۰/۳۴	۷/۶	۶۵۳			۷۰۰	۵۱	۴۵۶	S9	
۵۵	۰/۳۳	۷/۶	۶۵۳			۷۰۰	۵۱	۴۵۶	S10	
۴۲	۰/۳۰	۷/۶	۶۵۳			۷۰۰	۵۱	۴۵۶	S11	
۳۳	۰/۲۹	۷/۶	۶۵۳			۷۰۰	۵۱	۴۵۶	S12	
۴۵	۰/۳۱	۷/۶	۶۵۳			۷۰۰	۵۱	۴۵۶	S13	
۶۵	۰/۳۰	۷/۶		۶۰۳		۶۸۵	۵۱	۴۵۶	S14	
۸۵	۰/۳۲	۷/۶		۶۰۳		۶۸۵	۵۱	۴۵۶	S15	
۷۰	۰/۳۱	۷/۶		۶۰۳		۶۸۵	۵۱	۴۵۶	S16	
۴۲	۰/۲۷	۷/۶		۶۰۳		۶۸۵	۵۱	۴۵۶	S17	
۵۲	۰/۲۸	۷/۶		۶۰۳		۶۸۵	۵۱	۴۵۶	S18	
۵۸	۰/۲۹	۷/۶		۶۰۳		۶۸۵	۵۱	۴۵۶	S19	
۴۸	۰/۳۳	۷/۶	۴۷۵	۱۸۵		۶۸۵	۵۱	۴۵۶	S20	
۶۰	۰/۳۵	۷/۶	۴۷۵	۱۸۵		۶۸۵	۵۱	۴۵۶	S21	
۷۸	۰/۳۵	۷/۶	۲۰۵	۴۲۵		۶۸۵	۵۱	۴۵۶	S22	
۸۵	۰/۳۷	۷/۶	۲۰۵	۴۲۵		۶۸۵	۵۱	۴۵۶	S23	
۶۳	۰/۳۵	۷/۶	۶۱۰		۵۸۴		۵۱	۴۵۶	P1	
۵۲	۰/۳۳	۷/۶	۶۱۰		۵۸۴		۵۱	۴۵۶	P2	
۵۰	۰/۳۰	۷/۶	۵۶۵		۶۱۶		۵۱	۴۵۶	P3	
۷۸	۰/۳۳	۷/۶	۵۶۵		۶۱۶		۵۱	۴۵۶	P4	
۶۲	۰/۳۲	۷/۶	۵۱۶		۶۴۸		۵۱	۴۵۶	P5	
۷۳	۰/۳۰	۷/۶	۵۱۶		۶۴۸		۵۱	۴۵۶	P6	
۴۰	۰/۳۱	۷/۶		۵۴۸	۵۸۵		۵۱	۴۵۶	P7	
۵۰	۰/۳۳	۷/۶		۵۴۸	۵۸۵		۵۱	۴۵۶	P8	
۶۵	۰/۳۳	۷/۶	۳۱۲	۲۷۵	۵۸۵		۵۱	۴۵۶	P9	
۵۰	۰/۳۱	۷/۶	۳۱۲	۲۷۵	۵۸۵		۵۱	۴۵۶	P10	

وزن سنگدانه‌های سبک و معمولی در حالت SSD می‌باشند.

دیگر طبق تفاوت‌های ریز ساختاری سنگدانه با عنوان ساختار منفذ و چگالی تغییر می‌کند.



شکل ۵- جذب آب سنگدانه‌های اسکوریا و پومیس



شکل ۶- نرخ جذب آب سنگدانه‌های اسکوریا و پومیس

۳-۲- مقاومت فشاری سنگدانه سبک

مقاومت فشاری دانه‌های سبک با استفاده از رابطه پیشنهادی Chang و Su [۶] تعیین شد. از هر نوع سنگدانه، ۵۰ نمونه دانه بصورت تصادفی انتخاب شد و پس از آزمایش فشار تک محوری با دستگاه ELE-ADR ۲۰۰۰ تحت سرعت بارگذاری ۰/۱ kN/sec، به طور میانگین مقاومت فشاری اسکوریا و پومیس به ترتیب ۶/۷۲ و ۵/۰۵ Mpa تعیین شد. شکل (۷) هیستوگرام مقاومت فشاری دانه‌های سنگدانه‌های اسکوریا و پومیس را نشان می‌دهد. انحراف معیار اسکوریا ۳/۱۷ Mpa و پومیس ۳ Mpa و ۱/۶۴ و ضریب تغییرات اسکوریا و پومیس به ترتیب ۰/۴۷ و ۰/۳۲ تعیین شد. این موضوع بیانگر وجود تنوع بیشتر مقاومت فشاری در دانه‌های اسکوریا در مقایسه با پومیس است، به عبارت دیگر دانه‌های باطله در مصالح اسکوریا بیش از پومیس می‌باشد.

۳-۳- مقاومت فشاری بتن سبک

با مقایسه نتایج مخلوط‌های S1 تا S7 در جدول‌های (۵) و (۶) مشخص می‌شود که مقدار سیمان تأثیر زیاد روی مقاومت ندارد و با بکارگیری ماسه سبک به جای کل یا بخشی از ماسه طبیعی (مخلوط‌های S14 تا S23 و P7 تا P10) اثر چندانی

اسلامپ نمونه‌ها در محدوده ۳۳ تا ۸۵ میلی‌متر بودند. نمونه‌های بتن در قالب‌های فلزی ریخته شده و با یک میز لرزان متراکم شدند. بعد از ۲۴ ساعت، قالب‌ها باز گردیده و نمونه‌ها تا زمان آزمایش در آب $23 \pm 2^\circ\text{C}$ نگهداری شدند.

مقاومت فشاری f_c روی نمونه‌های استوانه‌ای 150×300 mm با نرخ بارگذاری ۰/۳۲ Mpa/sec و مدول گسیختگی f_r روی نمونه‌های منشوری $100 \times 100 \times 500$ mm با نرخ بارگذاری مرکزی و با نرخ بارگذاری $0/9$ Mpa/min (۰/۲ kN/sec) مطابق با ASTM C293 آزمایش شد. با رعایت استاندارد توصیه شده توسط ASTM C496 مقاومت کششی f_{ct} روی نمونه‌های استوانه‌ای 150×300 mm با نرخ بارگذاری 1000 kPa/min و $1/2$ kN/sec و مدول الاستیسیته (E_c) روی نمونه‌های استوانه‌ای 150×300 mm با نرخ بارگذاری 255 kPa/sec (۴/۵ kN/sec) مطابق با ASTM C469 آزمایش شد. موقع تعیین مقاومت فشاری، مدول الاستیسیته و کرنش محوری، برای از بین بردن اثر ناصافی و تمرکز تنش روی بدنه بتن، ابتدا و انتهای همه نمونه‌ها طبق توصیه‌های ASTM C617 با ماده گوگردی کلاهدک گذاری شدند.



شکل ۴- آزمایش تعیین مدول الاستیسیته

۳- نتایج و بحث

۳-۱- جذب آب سنگدانه سبک

شکل (۵) نشان می‌دهد که در ۵ دقیقه اول تفاوت میزان جذب آب سنگدانه‌های اسکوریا و پومیس کم بوده به طوری که با گذشت زمان، این اختلاف بیشتر می‌شود. در هر حالت، میزان جذب آب پومیس بیشتر از اسکوریا است. تفاوت نرخ جذب آب سنگدانه‌ها بطور واضح در شکل (۶) مشخص است. بیش از نصف جذب آب ۲۴ ساعت در مدت ۳۰ دقیقه اول رخ داده است. اما مشخص است که نرخ جذب از یک نوع سنگدانه به سنگدانه

نتایج تجربی در قالب رابطه ACI [۷] برای بتن سبک با شن و ماسه سبک و Slate و همکاران [۱۱] رابطه (۳) استخراج گردید:

$$f_{ct} = 0.486 \sqrt{f'_c} \quad (3)$$

و با برازش نتایج تجربی در فرم رابطه Zhang [۱] رابطه (۴) برای بتن سبک ساخته شده با اسکوریا و پومیس تعیین گردید:

$$f_{ct} = 0.266 \sqrt[3]{f'_c} \quad (4)$$

در رابطه (۳)، ACI [۷] برای بتن سبک با شن و ماسه سبک و Slate و همکاران [۱۱] به ترتیب ضریب ۰/۴۱۳ و ۰/۴۱۵ را پیشنهاد داده‌اند و برای رابطه (۴)، Zhang [۱] مقدار ۰/۲۳ را توصیه کرده است.

ضریب همبستگی معادلات (۳) و (۴) به ترتیب ۰/۷۹ و ۰/۶۲ بدست آمد. این ضرایب نشان می‌دهد که معادله (۳) با مشاهدات تجربی مطابقت بیشتری دارد.

۳-۵- مدول گسیختگی بتن سبک

با افزایش مقاومت فشاری از ۲۴ به ۵۱ Mpa، مدول گسیختگی (مقاومت کششی بتن در خمش) از ۲/۲۶ به ۳/۴۳ Mpa افزایش می‌یابد (جدول ۶).

با برازش نتایج تجربی در قالب رابطه ACI [۷] برای بتن سبک با شن و ماسه سبک و Slate و همکاران [۷] رابطه (۵) حاصل شد:

$$f_r = 0.568 \sqrt{f'_c} \quad (5)$$

و با برازش نتایج تجربی با فرم رابطه FIP [۱۲] رابطه (۶) استخراج گردید:

$$f_r = 0.311 \sqrt[3]{f'_c} \quad (6)$$

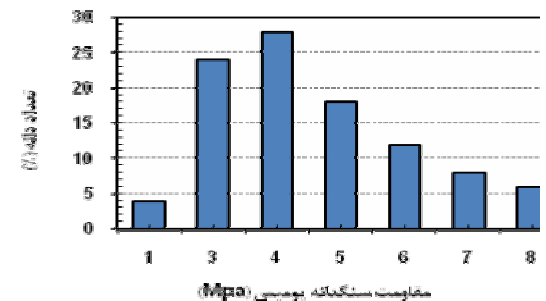
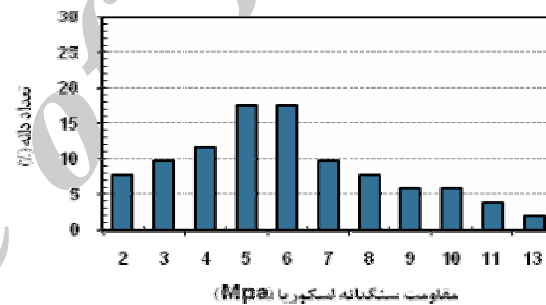
ACI [۷] برای بتن سبک با شن و ماسه سبک و Slate و همکاران [۷] برای رابطه (۵) به ترتیب ضریب ۰/۴۶۷ و ۰/۵۴ را پیشنهاد داده‌اند و FIP [۱۲] برای رابطه (۶) مقدار ۰/۳۰ را توصیه کرده است. ضریب همبستگی معادلات (۵) و (۶) به ترتیب ۰/۷۱ و ۰/۵۸ تعیین شد، بنابراین برای پیش‌بینی مدول گسیختگی بتن سبک، معادله (۵) مناسب می‌باشد. نتایج آزمایش نشان می‌دهد که مدول گسیختگی بتن سبک پراکندگی بیشتری دارد. این موضوع شاید به تأثیر سنگدانه‌های سبک برمی‌گردد.

روی مقاومت نداشتن ولی در وزن مخصوص بتن تأثیر معنی داری دارد. در حالت کلی آنچه می‌توان از جدول (۶) نتیجه گرفت این است که نوع سبک دانه، عامل اصلی در مقاومت فشاری بتن سبک است.

شکل (۸) رابطه بین وزن مخصوص بتن خشک شده و مقاومت فشاری ۲۸ روزه را نشان می‌دهد. برای پیش‌بینی مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن سبک نتایج تجربی با رابطه پیشنهادی Allington [۱۵] برازش شده، رابطه زیر استخراج گردید:

$$f'_c = 65.62 \left(\frac{w_c}{2400} \right)^2 \quad (2)$$

ضریب همبستگی رابطه وزن مخصوص خشک و مقاومت فشاری بتن سبک، ۰/۸۴ تعیین گردید.



شکل ۷- هیستوگرام مقاومت فشاری سنگدانه اسکوریا و پومیس

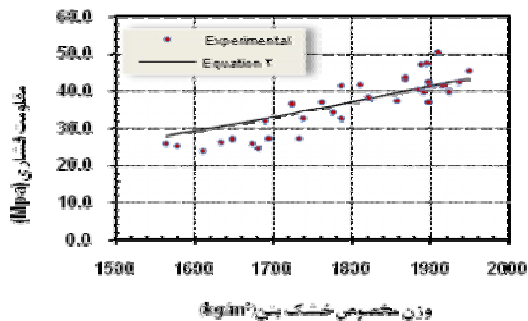
۳-۴- مقاومت کششی شکاف خوردگی بتن سبک

نتایج جدول (۶) نشان می‌دهد، هنگامی که مقاومت فشاری از ۲۴ به ۵۱ Mpa افزایش یابد، مقاومت کششی شکاف خوردگی از ۲/۸۱ به ۴/۴۹ Mpa افزایش می‌یابد.

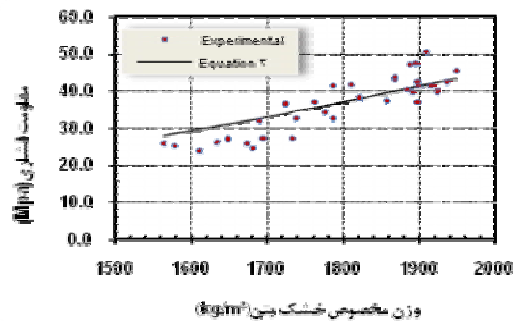
شکل (۹) رابطه بین مقاومت کششی شکاف خوردگی نمونه استوانه‌ای بتن سبک و مقاومت فشاری را نشان می‌دهد. با برازش

جدول ۶- مشخصات مکانیکی بتن سبک

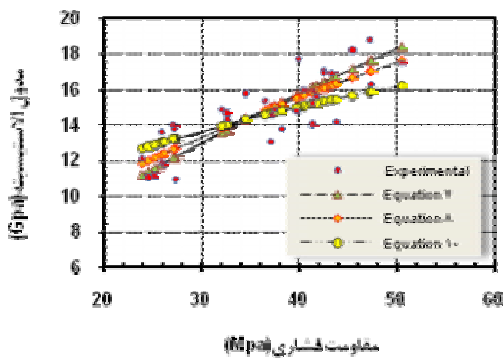
شماره طرح اختلاط	مقاومت فشاری f_c (Mpa)	مقاومت کششی f_{ct} (Mpa)	مدول گسیختگی f_t (Mpa)	مدول الاستیسیته E_c (Gpa)	کرنش متناظر با تنش حداکثر ϵ_c	وزن مخصوص خشک بتن (Kg/m^3) w_c
S1	۴۲	۳/۱۹	۳/۳۰	۱۵/۸۵۰	-/۰۰۰۳۳۲	۱۹۱۵
S2	۳۷	۲/۸۳	۳/۰۵	۱۴/۵۴۸	-/۰۰۰۳۰۵	۱۸۹۷
S3	۴۱	۲/۹۳	۳/۵۱	۱۵/۹۶۸	-/۰۰۰۳۱۸	۱۸۸۴
S4	۴۳	۳/۱۹	۳/۶۲	۱۷/۰۷۶	-/۰۰۰۳۱۸	۱۸۹۷
S5	۴۶	۳/۱۹	۳/۱۶	۱۸/۱۸۶	-/۰۰۰۳۴۳	۱۹۴۸
S6	۴۳	۳/۰۶	۳/۲۳	۱۶/۸۷۵	-/۰۰۰۳۰۰	۱۹۳۵
S7	۴۰	۲/۹۴	۳/۲۳	۱۷/۶۶۳	-/۰۰۰۲۸۲	۱۹۲۳
S8	۴۰	۲/۷۳	۳/۵۵	۱۴/۷۸۸	-/۰۰۰۳۴۲	۱۸۹۱
S9	۴۱	۳/۴۰	۳/۹۳	۱۴/۰۲۵	-/۰۰۰۳۶۰	۱۸۹۸
S10	۴۳	۳/۴۳	۴/۱۸	۱۶/۸۶۲	-/۰۰۰۳۰۳	۱۸۶۸
S11	۴۷	۳/۰۹	۳/۷۹	۱۸/۷۶۸	-/۰۰۰۳۱۱	۱۸۸۷
S12	۵۱	۳/۳۴	۴/۴۹	۱۷/۴۵۶	-/۰۰۰۳۷۸	۱۹۰۸
S13	۴۷	۳/۳۷	۳/۹۰	۱۶/۲۸۲	-/۰۰۰۳۶۷	۱۸۹۵
S14	۴۱	۳/۳۰	۳/۴۷	۱۵/۲۰۲	-/۰۰۰۳۶۷	۱۷۸۶
S15	۳۷	۲/۶۷	۲/۸۱	۱۳/۰۱۴	-/۰۰۰۳۴۱	۱۷۶۲
S16	۳۸	۲/۷۲	۲/۹۸	۱۴/۸۴۲	-/۰۰۰۳۴۵	۱۸۵۶
S17	۴۴	۳/۳۰	۴/۰۴	۱۴/۱۲۱	-/۰۰۰۳۶۱	۱۸۶۸
S18	۴۲	۳/۱۴	۳/۸۶	۱۵/۵۲۴	-/۰۰۰۳۴۹	۱۸۱۰
S19	۳۸	۳/۰۰	۳/۲۳	۱۳/۷۴۱	-/۰۰۰۳۲۷	۱۸۲۰
S20	۳۵	۳/۰۹	۳/۶۹	۱۵/۷۴۷	-/۰۰۰۲۸۲	۱۷۷۶
S21	۳۳	۲/۸۹	۳/۵۱	۱۴/۳۳۰	-/۰۰۰۲۸۵	۱۷۸۶
S22	۳۳	۲/۷۷	۳/۶۲	۱۴/۶۴۳	-/۰۰۰۳۱۸	۱۷۳۸
S23	۳۷	۲/۹۸	۳/۵۱	۱۵/۲۹۵	-/۰۰۰۳۳۲	۱۷۲۴
P1	۲۷	۲/۶۷	۳/۰۲	۱۰/۹۲۴	-/۰۰۰۲۹۹	۱۷۳۲
P2	۳۲	۲/۵۸	۳/۱۶	۱۴/۸۶۸	-/۰۰۰۳۳۱	۱۶۹۰
P3	۲۶	۲/۶۷	۳/۳۰	۱۱/۸۵۹	-/۰۰۰۲۷۶	۱۶۷۴
P4	۲۴	۲/۵۷	۳/۲۳	۱۲/۱۱۰	-/۰۰۰۳۰۳	۱۶۱۰
P5	۲۵	۲/۲۶	۲/۹۱	۱۱/۰۲۷	-/۰۰۰۲۷۷	۱۶۸۰
P6	۲۷	۲/۴۷	۳/۰۲	۱۳/۷۸۷	-/۰۰۰۲۵۵	۱۶۹۴
P7	۲۶	۲/۷۷	۲/۹۵	۱۳/۵۶۷	-/۰۰۰۲۷۱	۱۵۶۴
P8	۲۵	۲/۶۷	۲/۹۱	۱۱/۱۱۸	-/۰۰۰۲۹۱	۱۵۷۸
P9	۲۷	۲/۹۳	۳/۲۳	۱۳/۹۷۲	-/۰۰۰۲۶۱	۱۶۴۸
P10	۲۶	۲/۳۸	۲/۸۱	۱۱/۷۲۴	-/۰۰۰۲۷۴	۱۶۳۴



شکل ۹- رابطه بین مقاومت فشاری و مقاومت کششی LWAC



شکل ۸- رابطه بین مقاومت فشاری و چگالی خشک LWAC

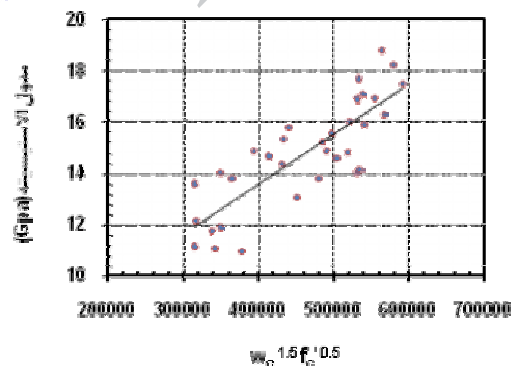


شکل ۱۱- رابطه بین مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته LWAC

۳-۷- کرنش متناظر با تنش حداکثر در بتن سبک

یکی از مهمترین عوامل اثرگذار روی شاخه‌های صعودی و نزولی منحنی تنش - کرنش، کرنش متناظر با تنش حداکثر (ϵ_o) است. بنابراین برای شناسایی منحنی تنش - کرنش بتن، باید کرنش ϵ_o مشخص باشد. جدول (۶) مقادیر ϵ_o ، ۳۳ نمونه بتن سبک را نشان می‌دهد.

همانطور که از شکل (۱۳) دیده می‌شود، در این تحقیق مقدار ϵ_o برای انواع مختلف بتن سبک در محدوده $2/55 - 3/78$ mm/m قرار داشته که در مقایسه با کرنش متناظر با تنش حداکثر بتن معمولی با مقاومت یکسان که در حدود $3/41 - 2/28$ mm/m است [۸]، مقادیر بیشتری دارند. آنچه از شکل (۱۳) مشخص می‌شود بطور متوسط با افزایش مقاومت فشاری، کرنش متناظر با تنش حداکثر نیز افزایش می‌یابد. جهت ارزیابی ϵ_o در محدوده اطلاعات بدست آمده برای بتن ساخته شده با اسکوریا و پومیس، روابط محققین که در جدول (۱) به آنها اشاره شده است مبنای تحلیل برازش داده‌ها قرار گرفت و معادله (۱۱) برای بتن سبک با سنگدانه اسکوریا و معادله (۱۲) برای سنگدانه پومیس پیشنهاد می‌شود:



شکل ۱۲- رابطه بین مقاومت فشاری و وزن مخصوص بتن خشک شده و مدول الاستیسیته LWAC

۳-۶- مدول الاستیسیته بتن سبک

مدول الاستیسیته مخلوط‌ها به نوع سنگدانه، نسبت آب آزاد به سیمان و مقدار سیمان وابسته است. شکل (۱۱) نشان می‌دهد که برای بتن سبک ساخته شده از سنگدانه‌های اسکوریا و پومیس، مدول الاستیسیته برای مقاومت‌های فشاری 51 Mpa - 24 در مقایسه با مدول الاستیسیته بتن معمولی در شرایط مقاومت یکسان که در حدود $28/31$ Gpa - $17/53$ بوده [۱] کمتر است.

با در نظر گرفتن شکل روابط ارائه شده توسط آیین نامه‌ها و محققان که در جدول (۱) به آنها اشاره شد و نتایج حاصل از آزمایش‌ها، برای بتن سبک تهیه شده از اسکوریا و پومیس موجود در منطقه، معادلات زیر به عنوان رابطه بین مدول الاستیسیته و مقاومت فشاری پیشنهاد می‌شوند:

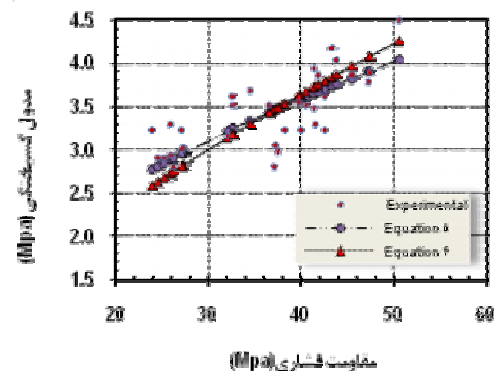
$$E_c = 1.344 \sqrt{f_c^2} \quad (7)$$

$$E_c = 2.162 f_c^{0.535} \quad (8)$$

$$E_c = 0.032 w_c^{1.5} \sqrt{f_c} \quad (9)$$

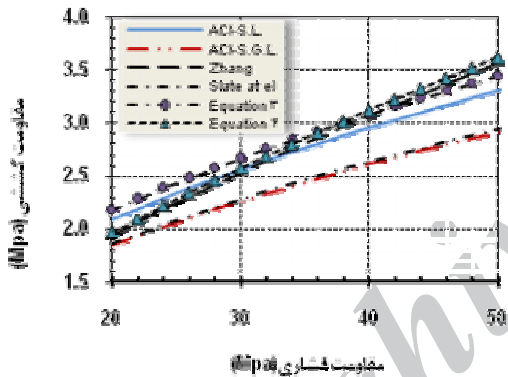
$$E_c = 7797 (f_c)^{\frac{1}{3}} \left(\frac{w_c}{2400} \right)^2 \quad (10)$$

در تعیین روابط حاکم بر مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته از روی نتایج آزمایش ضریب همبستگی معادلات (۷)، (۸)، (۹) و (۱۰) به ترتیب $0/82$ ، $0/84$ ، $0/64$ و $0/61$ تعیین شد. روابط پیشنهاد شده از نظر همبستگی قابل قبول و معنی دار هستند و در این بین معادله (۸) از همبستگی بالایی برخوردار بوده و با نتایج تجربی تطابق بالایی دارد.

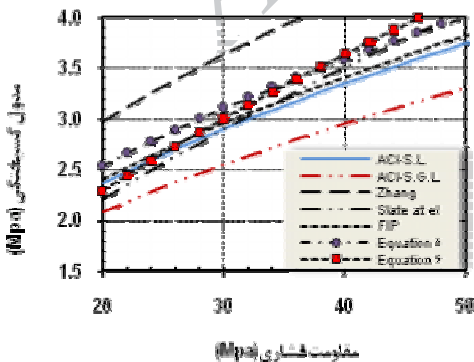


شکل ۱۰- رابطه بین مقاومت فشاری و مدول گسیختگی LWAC

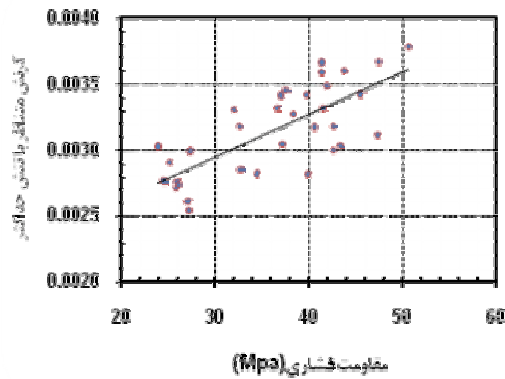
مقاومت فشاری بیشتر از ۳۰ Mpa می‌توان از روابط پیشنهادی ACI با ماسه سبک و Slate و همکاران استفاده کرد ولی برای مقاومت کمتر از ۳۰ Mpa حتماً باید از روابط (۵) یا (۶) استفاده شود. در هر صورت روابط (۵) و (۶) برای مصالح اسکوریا و پومیس محلی مناسب و اقتصادی می‌باشند. شکل (۱۶) نشان می‌دهد که معادله پیشنهادی ACI برای مدول الاستیسیته بتن سبک با مصالح سبک محلی غیر قابل استفاده است و معادله پیشنهادی Wang و همکاران [۹] محافظه کارانه و غیر اقتصادی می‌باشد. برای بتن سبک با مقاومت فشاری کمتر از ۳۲ Mpa رابطه CEB [۱۳] قابل استفاده بوده ولی غیراقتصادی می‌باشد. آنچه از شکل (۱۶) استنباط می‌شود روابط (۷)، (۸)، (۹) و (۱۰) کاملاً به هم منطبق نبوده و انحراف دارند. بهتر است در محاسبات از رابطه (۸) که مطابقت بیشتری با نتایج تجربی دارد استفاده شود.



شکل ۱۳- مقایسه روابط بین مقاومت فشاری و مقاومت کشش شکاف خوردگی LWAC



شکل ۱۴- مقایسه روابط بین مقاومت فشاری و مدول گسیختگی LWAC



شکل ۱۵- رابطه بین مقاومت فشاری و کرنش متناظر با تنش حداکثر LWAC

$$\varepsilon_o = (56.03f_c^{0.44} + 42.82) \times 10^{-5} \quad (11)$$

$$\varepsilon_o = (65.50f_c^{0.44} + 6.99) \times 10^{-5} \quad (12)$$

ضرایب همبستگی معادلات (۱۱) و (۱۲) به ترتیب ۰/۴۵ و ۰/۵۰ و سطح معنی‌داری، کمتر از ۰/۰۵ تعیین شد. که برای هر دو مورد ضرایب معنی‌دار و قابل قبول می‌باشند.

۴- مقایسه روابط پیشنهادی با روابط موجود

با مقایسه روابط مربوط به مقاومت فشاری و مقاومت کشش شکاف خوردگی (شکل (۱۴)) می‌توان نتیجه گرفت که مقاومت کششی تخمینی توسط رابطه ACI [۷] برای بتن با ترکیب شن و ماسه سبک و رابطه Slate و همکاران [۱۱] کمتر از مقادیر تخمینی از روابط پیشنهادی (معادله (۳) و (۴)) برای سنگدانه‌های اسکوریا و پومیس منطقه آذربایجان می‌باشد. روابط ACI [۷] برای بتن با ماسه سبک با مقاومت‌های فشاری بیش از ۳۰ Mpa و Zhang [۱] برای همه مقاومت‌های فشاری مورد آزمایش در تخمین مقاومت کششی، با روابط پیشنهادی مطابقت نسبی قابل قبولی دارند. با مشاهده شکل (۱۴) استنباط می‌شود که برای تخمین مقاومت کششی بتن‌های با مقاومت‌های فشاری کمتر از ۳۰ Mpa، بهتر است از رابطه (۴) استفاده شود. رابطه Zhang [۱] تا حدودی با رابطه (۴) مطابقت دارد.

رابطه پیشنهادی ACI برای بتن با شن و ماسه سبک برای مدول گسیختگی در مورد سنگدانه‌های اسکوریا و پومیس محافظه کارانه و غیراقتصادی می‌باشد، در حالی که رابطه پیشنهادی Zhang غیر معتبر است (شکل (۱۵)). برای بتن با

۶- نتیجه گیری

در این تحقیق خصوصیات مکانیکی بتن ساخته شده با سنگدانه‌های طبیعی موجود در منطقه آذربایجان - ایران مطالعه شده و روابط موجود با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه گردیده است و برای اهداف طراحی سازه‌های معادلات جدید سازگار با این مصالح ارائه شد. نتایج تجربی نشان می‌دهند که:

۱- در شرایط یکسان، مقاومت سنگدانه بیشتر به عنوان عامل اصلی تعیین کننده مقاومت بتن سبک می‌باشد. با مقایسه مقاومت فشاری دانه اسکوریا و پومیس و مقاومت فشاری بتن ساخته شده در شرایط یکسان، مشاهده شد که با کاهش ۲۵ درصدی مقاومت سنگدانه، مقاومت فشاری بتن در حدود ۳۷٪ کاهش می‌یابد.

۲- مقاومت کشش شکاف خوردگی از $2/26-3/43$ Mpa و خمشی از $2/81-4/49$ Mpa متغیر بودند. با مقایسه روابط پیشنهادی با رابطه ACI (برای بتن معمولی با $\lambda=1$) مشخص می‌شود که نسبت مقاومت کششی به فشاری بتن سبک کمتر از بتن معمولی است.

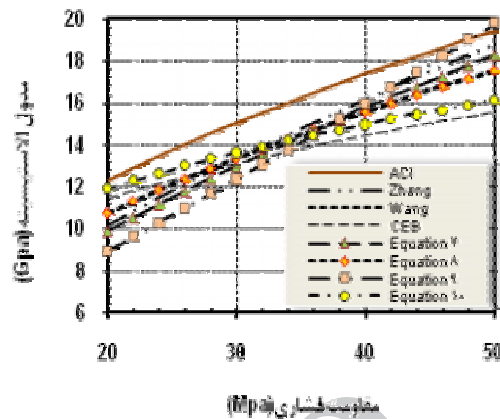
۳- با مقایسه روابط مقاومت کششی شکاف خوردگی و مقاومت فشاری بتن ارائه شده توسط ACI برای بتن با ماسه سبک و بتن سبک تهیه شده با اسکوریا و پومیس محلی مشخص شد که برای مقاومت‌های فشاری بیش از 30 Mpa رابطه ACI محافظه کارانه می‌باشد.

۴- در تعیین مدول گسیختگی، رابطه پیشنهادی ACI با شن و ماسه سبک در مورد سنگدانه‌های اسکوریا و پومیس محافظه کارانه و غیراقتصادی و رابطه پیشنهادی Zhang قابل قبول نمی‌باشد.

۵- استفاده از روابط پیشنهادی ACI برای بتن با ماسه سبک و Slate و همکاران برای تعیین مدول گسیختگی بتن سبک ساخته شده با اسکوریا و پومیس محلی با مقاومت‌های فشاری بیش از 30 Mpa محافظه کارانه می‌باشد و بهتر است از روابط پیشنهادی (۵) و (۶) برای مصالح اسکوریا و پومیس استفاده گردد.

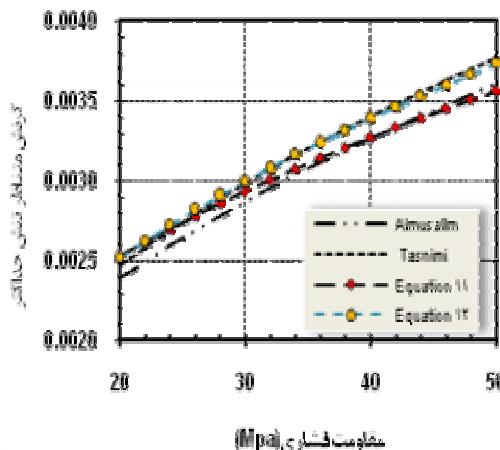
۶- مدول الاستیسیته بتن سبک در دامنه $10/92-18/77$ Gpa متغیر بوده که در مقایسه با مدول الاستیسیته بتن معمولی با شرایط مقاومتی یکسان که در حدود $28/31-17/53$ Gpa است [۸] کمتر می‌باشد.

۷- نتایج حاصل از معادله پیشنهادی ACI برای مدول الاستیسیته بتن سبک با مصالح سبک محلی خیلی بیشتر از مقادیر واقعی است و معادله پیشنهادی Wang و همکاران [۹]



شکل ۱۶- مقایسه روابط بین مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته LWAC

شکل (۱۷) نشان می‌دهد که رابطه (۱۲) در مورد بتن سبک ساخته شده با پومیس برای هر نوع مقاومت فشاری و رابطه (۱۱) برای بتن سبک تهیه شده با اسکوریا برای مقاومت فشاری کمتر از 30 Mpa با رابطه پیشنهادی Tasnimi [۸] مطابقت می‌کنند در حالی که برای بتن ساخته شده با اسکوریا با مقاومت فشاری بیش از 40 Mpa و رابطه (۱۱) با رابطه Almusallm [۱۰] مطابقت دارد. توصیه می‌شود موقع بررسی رفتار بتن سبک تهیه شده با سنگدانه اسکوریا و پومیس محلی حتماً با توجه به نوع سنگدانه مصرفی، از معادله (۱۱) و (۱۲) استفاده شود.



شکل ۱۷- مقایسه روابط بین مقاومت فشاری LWAC و کرنش متناظر با آن

- Commentary", Detroit, MI, 2002, ACI 318-05.
- [8] Tasnimi A.A., "Mathematical Model for Complete Stress-Strain Curve Prediction of Normal, Light- Weight and High-Strength Concretes", Magazine of Concrete Research, 2004, 56(1), pp 23-34.
- [9] Wang P.T., Shah S.P., Naaman A.E., "Stress-Strain Curve for Normal and Lightweight Concrete in Compression", American Concrete Institute J. Proc., 1978, 75 (11), 603-611.
- [10] Almusallam T.H., Alsayed H., "Stress-Strain relationship of Normal, High-Strength and Lightweight Concrete", Magazine of Concrete Research, 1995, 47(170), pp 39-44.
- [11] Slate F.O., Nilson A.H., Martinez S. "Mechanical Properties of High-Strength Lightweight Concrete", American Concrete Institute J. Proc., 1986, 83 (4), pp 606-613.
- [12] FIP Manual of lightweight Aggregate Concrete, Second Edition, Surrey University Press, Halsted Press, New York, 1983.
- [13] Euro-International Committee for Concrete (CEB), "Draft International Standard Model Code for Concrete Construction", CEB, Paris, 1977.
- [14] American Concrete Institute, "Standard Practice for Selecting Proportions for Structural Lightweight Concrete", ACI 211.2-91.
- [15] Allington, C.J., "Seismic Performance of Moment Resisting frame Members Produced from Lightweight Aggregate Concrete", Phd Thesis, University of canterbury, New Zealand, 2003.
- محافظة کارانه می‌باشد. توصیه می‌شود در محاسبات از رابطه (۸) که مطابقت بیشتری با نتایج تجربی مربوط به بتن سبک ساخته شده با اسکوریا و پومیس محلی دارد استفاده شود.
- ۸- کرنش متناظر با تنش حداکثر (ϵ_o) برای بتن سبک بین $2/55-3/78$ mm/m متغیر بود که در مقایسه با کرنش بتن معمولی با شرایط مقاومتی یکسان که در حدود $3/41$ mm/m- $2/28$ می‌باشد [۸] بیشتر است
- ۸- مراجع
- [1] Zhang, M.H., Gjorv, O.E., "Mechanical Properties of High-Strength Lightweight Concrete", ACI Materials Journal, 1991, 88 (3), 240-246.
- [2] American Concrete Institute, "Guide for Structural Lightweight-Aggregate Concrete", ACI 213R-03.
- [3] Chi, J.M., Huang, R., Yang, C.C., Chang, J.J., "Effect of Aggregate Properties on the Strength and Stiffness of Lightweight Concrete", Cement & Concrete Composites, 2003, 25, 197-205.
- [4] Hossain K.M.A., "Properties of Volcanic Pumice Based Cement and Lightweight Concrete", Cement and Concrete Research, 2004, 34, pp 283-291.
- [5] Anwar Hossain, K.M., " Blended Cement and Lightweight Concrete Using Scoria: Mix Design, Strength, Durability and Heat Insulation Characteristics", International Journal of Physical Sciences, 2006, 1 (1), 5-16.
- [6] Chang, T.P., Su N. K., "Estimation of Coarse Aggregate Strength in High-Strength Concrete", ACI Materials Journal, 1996, 93 (1), 3-8.
- [7] American Concrete Institute, "Building Code Requirements for Reinforced Concrete and