

ویژگی های مهندسی نانو - بتن سبک و اثر آن در رفتار لرزه‌ی سازه‌های ساختمانی

عباسعلی تسنیمی* (استاد)

سمیرا بیات کشکولی (دانشجوی کارشناسی ارشد)

گروه مهندسی سازه، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس

مهندسی عمران شریف، زمستان ۱۳۹۳ (۱۲-۳-۲)
دوره ۲ - شماره ۳، شماره ۴/۲، ص. ۱۲-۳

کاهش وزن ساختمان‌ها ضمن کوچک‌تر کردن ابعاد اعضای سازه‌ی، موجب کاهش نیروی ناشی از زلزله نیز می‌شود. برای کاهش وزن سازه می‌توان از بتن سبک در اعضای سازه‌ی و غیرسازه‌ی استفاده کرد. به‌کارگیری بتن سبک در اعضای سازه‌ی، نیازمند تأمین کمیته‌ی مقاومت آئین‌نامه‌ی است. برای تأمین مقاومت کاهش‌یافته‌ی ناشی از سبک‌دانه، می‌توان از نانوسیلیس به‌منزله‌ی یکی از تقویت‌کننده‌ها استفاده کرد، که علاوه بر افزایش سرعت هیدراسیون سیمان و واکنش با هیدروکسید کلسیم، ژل سیلیکات کلسیم (C-S-H) تشکیل می‌دهد، که به مراتب مستحکم‌تر از هیدروکسید کلسیم است. در این نوشتار، ویژگی‌های مکانیکی بتن سبک ساخته‌شده از سبک‌دانه‌ی رس منبسط‌شده برای دو نوع بتن بدون نانوسیلیس و با نانوسیلیس مورد آزمایش قرار گرفته‌اند. نتایج نشان داده است که در صورت افزودن نانوسیلیس، میانگین مقاومت فشاری ۴۷٪، مقاومت خمشی ۵۷٪، مقاومت شکافتگی ۲۶٪ و مدول ارتجاعی ۷۹٪ افزایش می‌یابد. همچنین بررسی عملکرد سازه‌ی بتن سبک در اعضای سازه‌ی و غیرسازه‌ی و بتن سبک دارای نانوسیلیس در اعضای سازه‌ی نشان داده است که تغییر چشم‌گیری در رفتار لرزه‌ی ساختمان‌های بتن مسلح ایجاد نمی‌شود.

واژگان کلیدی: بتن سبک، خواص مکانیکی، نانوسیلیس، بتن سبک، کاربرد سازه‌ی.

tasnimi@modares.ac.ir
samira.bayat.5@gmail.com

۱. مقدمه

با سولفات‌ها ترکیب می‌شود، که حاصل آن گچ (سولفوآلومینات کلسیم) با افزایش حجم چند برابری موجب تخریب بتن می‌شود.^[۴] جایگزینی بخشی از سیمان با موادی مانند دوده‌ی سیلیسی باعث گسترش واکنش پوزولانی و تبدیل هیدروکسید کلسیم حاصل از هیدراسیون به ژل سیلیکات کلسیم هیدراته می‌شود. گفته می‌شود که با ۱۰٪ جایگزینی دوده‌ی سیلیسی در خمیر سیمان، بیشینه‌ی مقدار هیدروکسید کلسیم بعد از ۱۰ روز ۱۱/۲٪ و بعد از ۱۸۰ روز ۸/۳٪ می‌شود.^[۵] در سال ۲۰۰۶، در مطالعه‌ی فعالیت پوزولانی بتن با افزودن نانوسیلیس و دوده‌ی سیلیسی مورد بررسی قرار گرفته است.^[۶] مقاومت فشاری بتن دارای نانوسیلیس در سنین ۳ و ۷ و ۲۸ روزه به ترتیب ۳۰٪، ۲۶٪ و ۲۲٪ از مقاومت بتن معمولی و ۱۶٪، ۱۱٪ و ۱۴٪ از نمونه دارای دوده‌ی سیلیسی بیشتر است. مقاومت خمشی بتن دارای نانوسیلیس در همان سنین ۳۱٪، ۴۸٪ و ۵۷٪ از نمونه‌ی شاهد و ۶٪، ۱۲٪ و ۱۴٪ از نمونه دارای دوده‌ی سیلیسی بیشتر است. هیدروکسید کلسیم اندازه‌گیری شده در سنین ۱، ۳ و ۲۸ روزه، در نمونه‌ی خمیری دارای دوده‌ی سیلیسی ۶۳٪، ۶۰٪ و ۱۹٪ است؛ در صورتی که در نمونه‌ی خمیری دارای نانوسیلیس ۳۳٪، ۲۰٪ و ۱۳٪ است. پژوهشگری در بررسی‌های خود دریافته است که مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن با جایگزینی ۱۰٪ سیمان با دوده‌ی سیلیسی برابر مقاومت فشاری بتن با جایگزینی

بتن سبک به‌صورت موفقیت‌آمیزی برای اهداف سازه‌ی نظیر پل‌های با دهانه‌ی بزرگ و سازه‌های تخت ساحلی به‌کار رفته است.^[۱] بتن سبک‌دانه، بتن سبکی است که تمام یا بخشی از دانه‌بندی آن از سبک‌دانه‌ها تشکیل شده باشد.^[۲] مطابق آیین‌نامه‌ی ۸۷-۲۱۳-ACI،^[۳] بتن سبک‌دانه با مقاومت فشاری ۱۷/۲ مگاپاسکال و وزن مخصوص خشک ۱۴۴۰ تا ۱۸۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب را می‌توان بتن سبک سازه‌ی نامید. بتن سبک با مقاومت کمتر از مقدار مذکور به‌عنوان بتن سبک سازه‌ی شناخته نمی‌شود. برای جبران اثر کاهش مقاومت ناشی از به‌کار بردن سبک‌دانه، می‌توان از مواد تقویت‌کننده استفاده کرد. در حالت کلی مقاومت بتن به ریزساختارها وابسته است، اگرچه ریزساختارها یگانه عامل مؤثر در مقاومت فشاری نیستند.^[۲] بررسی‌ها نشان داده است که در بتن سبک، لایه‌ی مرزی میان خمیر سیمان هیدراته‌شده و سنگ‌دانه یک پیوند ضعیف است.^[۱] از طرف دیگر، هیدروکسید کلسیم نیز منشأ ضعف بتن است، زیرا آب آن را در خود حل می‌کند و با انتقال آن به بیرون و روی سطح بتن، به‌صورت (سفیدک یا پودر کربنات کلسیم) رسوب می‌دهد. این رسوب

* نویسنده مسئول

تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۷/۹، اصلاحیه ۱۳۹۱/۱۱/۲۳، پذیرش ۱۳۹۲/۴/۱.

هم مخلوط، و سپس آب به همراه افزودنی طی ۲ تا ۴ دقیقه به تدریج به مخلوط اضافه و به مدت ۱ دقیقه محتویات مخلوطکن با هم مخلوط می‌شوند.^[۱۷]

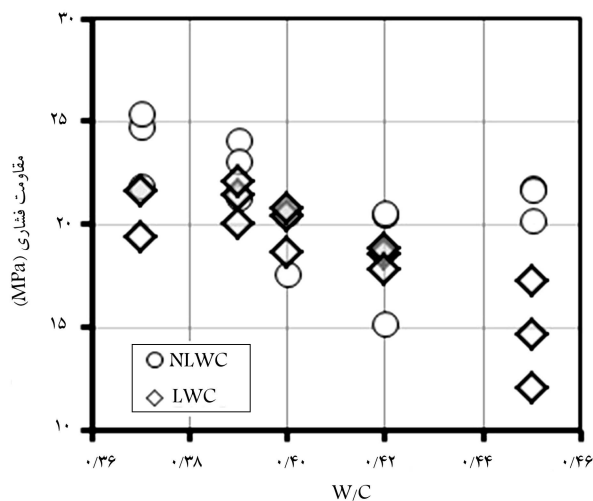
در این مطالعه، پس از اختلاط به ۳ روش فوق مشاهده شد که فقط در روش سوم، بتن حاصل طی فرایند اختلاط کلوخه نمی‌شود و همگنی مناسبی نیز دارد. پس از اختلاط، ابتدا اسلامپ بتن مطابق ASTM-C ۱۴۳،^[۱۸] اندازه‌گیری و سپس بتن درون قالب‌ها ریخته شد. چنانچه اسلامپ بتن کمتر از ۲/۵ میلی‌متر بود، بتن با استفاده از ویبراتور مطابق استاندارد مربوطه و بیبره و در صورتی که اسلامپ، بزرگ‌تر یا مساوی مقدار مذکور بود، بتن کوبیده می‌شد.^[۱۶] نمونه‌ها پس از ۱ روز قالب خارج و برای عمل‌آوری درون آب گذاشته شدند، پس از آن مطابق سن در نظر گرفته شده از آب خارج شدند و مورد آزمایش قرار گرفتند.

۳.۲. نسبت آب به سیمان

برای تشخیص دقیق میزان آب لازم برای کسب مقاومت بهینه‌ی مخلوط بتن، نمونه‌هایی از مخلوط مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور از نسبت‌های وزنی جدول ۵ و تغییر نسبت آب به سیمان (۰/۳۷، ۰/۳۹، ۰/۴، ۰/۴۲، ۰/۴۵) به منظور کسب بیشترین مقاومت فشاری استفاده شد. مقاومت فشاری ۷ روزه‌ی نمونه‌های بتن سبک دارای این نسبت‌ها مطابق جدول ۶ به دست آمد و در شکل ۲ نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که هر دو نوع بتن سبک دارای نانوسیلیس و بدون نانوسیلیس با نسبت آب به سیمان ۰/۳۷ بیشترین مقاومت را دارند. بنابراین، برای تعیین دیگر خصوصیات این دو نوع بتن از نسبت آب به سیمان ۰/۳۷ استفاده شد، که وزن مخصوص خشک آن با توجه به استاندارد ASTM C ۵۶۷،^[۱۹] براساس رابطه‌ی ۱ محاسبه شد:

$$Q_c = (M_{df} + M_{dc} + 1/2 M_{ct}) / V \quad (1)$$

که در این رابطه، Q_c وزن مخصوص خشک بتن بر حسب کیلوگرم بر مترمکعب است، که با استفاده از M_{df} و M_{dc} وزن ریزدانه‌ها و درشت‌دانه‌ها و M_{ct} وزن سیمان بر حسب کیلوگرم به دست می‌آید. V حجم بتن بر حسب مترمکعب است. مقدار وزن مخصوص خشک بتن سبک با نسبت آب به سیمان ۰/۳۷ با استفاده از رابطه‌ی مذکور برابر ۱۶۷۵ کیلوگرم بر مترمکعب به دست آمد.



شکل ۲. مقاومت فشاری ۷ روزه‌ی بتن سبک و بتن سبک دارای نانوسیلیس.

جدول ۳. نسبت‌های اختلاط براساس ACI-۲R-۹۸.

مصالح	نسبت‌های حجمی	نسبت‌های وزنی
آب	۰/۲۳۲۵	۲۳۲/۵
سیمان	۰/۱۱	۳۴۱/۹۱
لیکا	۰/۴	۳۳۲/۶۴
ماسه	۰/۲۳	۵۷۰/۰۷

جدول ۴. طرح اختلاط اولیه.

مصالح	نسبت‌های حجمی	نسبت‌های وزنی
آب	۰/۱۵۷	۱۵۷
سیمان	۰/۱۵۳	۴۷۵
لیکا	۰/۳۱	۴۱۰
ماسه	۰/۳۴	۸۴۰

جدول ۵. نسبت‌های وزنی اختلاط.

مصالح	نمونه‌ی بتن	
	NLWC	LWC
سیمان (kg)	۴۷۵	۴۷۵
نسبت آب به سیمان	۰/۴۵	۰/۴۵
لیکا (kg)	۲۵۵	۲۵۵
ماسه (kg)	۸۵۰	۸۵۰
درصد فوق روان‌کننده	۱/۸	۲
درصد نانوسیلیس	۳	۳

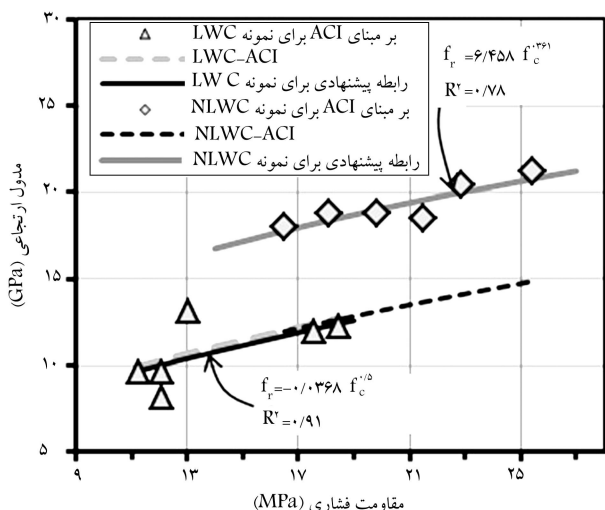
از نسبت‌های اختلاط مشابه با ACI اما با نسبت آب به سیمان ۰/۲۹ را برای مقاومت ۳۰ مگاپاسکال توصیه کرده است، طرح اختلاط اولیه با نسبت‌های ارائه شده در جدول ۴ به دست آمد. در این مطالعه برای اینکه اثر نانوسیلیس بر بتن به خوبی بررسی شود، از طرح اختلاطی که با سیمان بیشتر تدارک دیده شده استفاده شده است.

طرح اختلاط اولیه با توجه به وزن مخصوص مصالح مورد استفاده و جذب آب سنگ‌دانه‌ها تصحیح شد، که سرانجام برای نسبت‌های اختلاط وزنی، نسبت آب به سیمان ۰/۴۵ مطابق جدول ۵ اختیار شد. این تذکر لازم است که در نمونه‌های دارای نانوسیلیس، از نانوسیلیس برای جایگزینی درصد وزنی سیمان استفاده شده است. مطالعات انجام شده نشان می‌دهد که برای اختلاط بتن سبک‌دانه می‌توان از روش استفاده کرد:

- در ابتدا، مشابه بتن معمولی درشت‌دانه‌ها به همراه مقداری آب، که قبلاً با فوق روان‌کننده مخلوط شده است، درون مخلوطکن ریخته و پس از آن ماسه، سیمان و بقیه‌ی آب به تدریج به مخلوط اضافه می‌شود. این اختلاط به مدت ۳ دقیقه ادامه می‌یابد و پس از آن ۳ دقیقه مخلوطکن خاموش و در انتها با ۲ دقیقه اختلاط مجدد، بتن آماده استفاده می‌شود.^[۱۶]
- بتن در دو بخش جداگانه مخلوط می‌شود: بخش اول که شامل سیمان، ماسه، افزودنی و حدود دو سوم آب است، مخلوط و بخش دوم، درشت‌دانه‌ها به همراه باقیمانده‌ی آب به مخلوط بخش اول اضافه می‌شود.^[۱۱]
- مصالح خشک شامل درشت‌دانه، سیمان و ماسه در ابتدا به مدت ۱ دقیقه با

جدول ۶. تغییر نسبت آب به سیمان و مقاومت فشاری ۷ روزهی بتن سبک و بتن سبک دارای نانو سیلیس.

نمونه	نسبت آب به سیمان	درصد فوق روان‌کننده	درصد نانوسیلیس	اسلامپ (cm)	وزن مخصوص (kg/m ^۳)	مقاومت فشاری (MPa)
LWC-Cyl-۱	۰٫۴۵	۱٫۸		۳۰	۱۷۶۰	۱۴٫۶
LWC-Cyl-۲	۰٫۴۲	۱٫۸		۱۹	۱۷۷۱	۱۸٫۳۷
LWC-Cyl-۳	۰٫۴	۱٫۵		۰	۱۷۷۹	۱۹٫۹۳
LWC-Cyl-۴	۰٫۳۹	۲		۰	۱۷۸۱	۲۱٫۱۷
LWC-Cyl-۵	۰٫۳۷	۱٫۵		۰	۱۷۹۰	۲۰٫۵
NLWC-Cyl-۱	۰٫۴۵	۲	۳	۱۵	۱۷۴۴	۲۱٫۲۳
NLWC-Cyl-۲	۰٫۴۲	۲٫۲	۳	۱۹	۱۷۵۵	۱۸٫۷۷
NLWC-Cyl-۳	۰٫۴	۲٫۴	۳	۱۸٫۵	۱۷۶۰	۱۹٫۱
NLWC-Cyl-۴	۰٫۳۹	۲٫۶	۳	۱۹	۱۷۶۵	۲۲٫۸۳
NLWC-Cyl-۵	۰٫۳۷	۲٫۶	۳	۱۶	۱۷۷۲	۲۴٫۰۳



شکل ۳. تغییرات مدول ارتجاعی بر حسب مقاومت فشاری بتن سبک و بتن سبک دارای نانوسیلیس.

نتایج این تحقیق (با ضرایب همبستگی قابل قبول) برای دو نوع بتن نتایج متفاوت و مستقلاً را به دست می‌دهد، که برای بتن سبک دارای نانوسیلیس رابطه‌ی ۲ پیشنهاد می‌شود:

$$E_c = 67458 f_c^{0.261} \quad (2)$$

آخرین ستون جدول ۷، مقدار کرنش نظیر بیشینه‌ی مقاومت فشاری دو نوع بتن را ارائه می‌دهد، که تقریباً به یکدیگر نزدیک است. همچنین در شکل ۴ تغییرات کرنش نظیر بیشینه‌ی تنش در مقابل مقاومت فشاری ترسیم شده و روابط آنها با بارش غیرخطی نشان داده شده است. رابطه‌ی ۳، کرنش نظیر مقاومت فشاری بتن سبک دارای نانوسیلیس را نشان می‌دهد:

$$\varepsilon_c = 47473 \times 10^{-4} f_c^{0.2} \quad (3)$$

۳. آزمایش نمونه‌ها

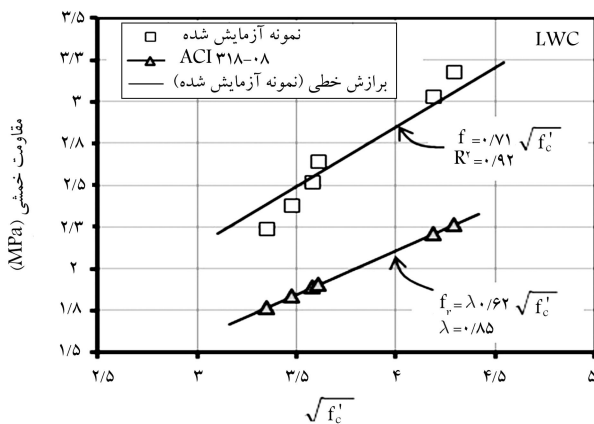
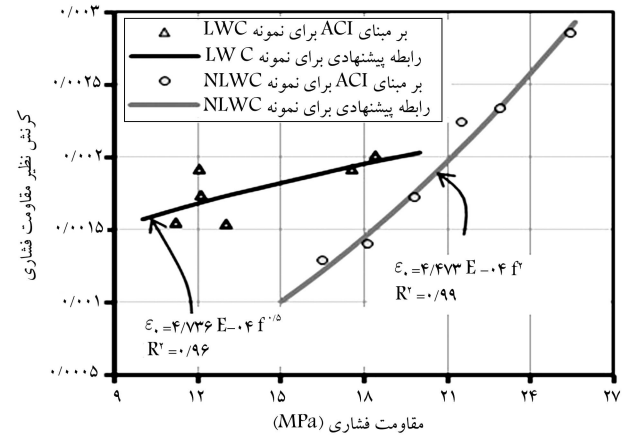
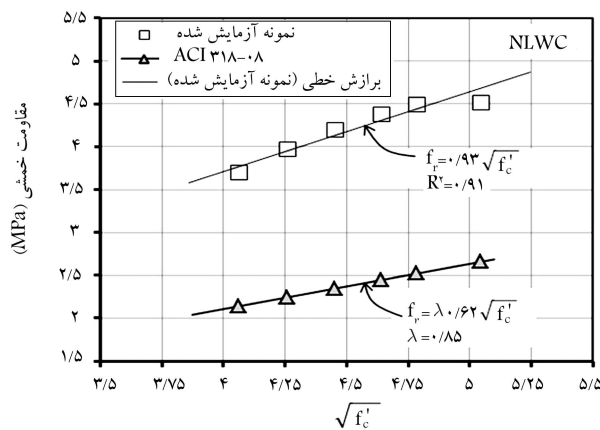
۳.۱. مقاومت فشاری و مدول ارتجاعی

پس از تعیین نسبت‌های اختلاط نهایی، مخلوط بتن حاصل مطابق استاندارد ASTM-C۱۹۲ [۱۶]، برای نمونه‌های مربوط به تعیین ویژگی‌های بتن سبک و بتن سبک دارای نانوسیلیس قالب‌ریزی و عمل‌آوری شد. تمام نمونه‌ها در سن ۷ روزه از آب خارج شدند و با توجه به استانداردهای مربوط مورد آزمایش قرار گرفتند. برای تعیین مقاومت فشاری از نمونه‌های استوانه‌ای با ابعاد 150×300 mm مطابق استاندارد ASTM-C۳۹ [۲۰] در دستگاه ELE به ظرفیت ۲۰۰۰ کیلونیوتن و با سرعت بارگذاری ۰٫۲۸ مگاپاسکال بر ثانیه استفاده شد. مدول ارتجاعی نمونه‌های ۲۸ روزه با رعایت استاندارد ASTM-C۴۹۶ [۲۱]، و با سرعت بارگذاری ۰٫۲۸ تعیین شد. در این آزمایش‌ها برای از بین بردن تمرکز تنش، مطابق استاندارد ASTM-C۶۱۷ [۲۲] کلاهک‌گذاری به دو شیوه با خمیر گوگرد و با خمیر سیمان با مقاومت میانگین ۳۷٫۹۶ مگاپاسکال بر روی نمونه‌ها انجام شد.

با توجه به اینکه مقاومت فشاری نمونه‌ی استوانه‌ای نسبتی مشخص از مقاومت فشاری نمونه‌ی مکعبی است، مبحث نهم مقررات ملی ایران برای بتن معمولی این نسبت را برابر ۰٫۸ ارائه می‌دهد. میانگین این نسبت برای بتن سبک و بتن سبک دارای نانوسیلیس به ترتیب برابر با ۰٫۵۳ و ۰٫۶۶ به دست آمد، که مقدار آنها در جدول ۷ آورده شده است. مطابق این جدول، اگر در طرح اختلاط بتن سبک ۳٪ سیمان با نانوسیلیس جایگزین شود، میانگین مقاومت فشاری استوانه‌ای، فشاری مکعبی و مدول ارتجاعی بتن سبک دارای نانوسیلیس نسبت به مقادیر نظیر بتن سبک به ترتیب ۴۷، ۲۴ و ۷۹ درصد افزایش می‌یابد. در شکل ۳، تغییرات مدول ارتجاعی بتن سبک و بتن سبک دارای نانوسیلیس برای برقراری ارتباط میان مدول ارتجاعی و مقاومت فشاری بتن سبک دارای نانوسیلیس و در مقایسه با رابطه‌ی ACI آورده شده است. چنانچه ملاحظه می‌شود روابط پیشنهادی ACI برای هر دو نوع بتن به یک نتیجه انجامیده است. در حالی که روابط به دست آمده از بارش

جدول ۷. مشخصات مهندسی بتن سبک و بتن سبک دارای نانوسیلیس (۲۸ روزه).

نمونه‌های با نسبت آب به سیمان ۰٫۳۷	مقاومت فشاری		نسبت کششی به مقاومت	مقاومت خمشی (MPa)	نسبت کششی به مقاومت فشاری	کششی (MPa)	نسبت استوانه‌یی به مکعبی	مقاومت فشاری	
	مکعبی	استوانه‌یی						مکعبی	استوانه‌یی
LWC-Cy۱ & Cub۱	۱۱٫۲۴	۲۶	۰٫۴۳	۲٫۲۴	۰٫۱۹	۲٫۱۰	۰٫۴۳	۹٫۵۸	۰٫۲۰
LWC-Cy۲ & Cub۲	۱۲٫۰۷	۲۵	۰٫۴۸	۲٫۳۸	۰٫۱۸	۲٫۲۰	۰٫۴۸	۸٫۱۳	۰٫۲۰
LWC-Cy۳ & Cub۳	۱۲٫۱۱	۲۶٫۷	۰٫۴۵	۲٫۵۱	۰٫۱۹	۲٫۲۸	۰٫۴۵	۹٫۶۶	۰٫۲۱
LWC-Cy۴ & Cub۴	۱۳٫۰۵	۲۶٫۷	۰٫۴۸	۲٫۶۴	۰٫۱۸	۲٫۴۱	۰٫۴۸	۱۳٫۱۰	۰٫۲۰
LWC-Cy۵ & Cub۵	۱۷٫۵۵	۲۷	۰٫۶۵	۳٫۱۸	۰٫۱۵	۲٫۵۵	۰٫۶۵	۱۱٫۹۰	۰٫۱۸
LWC-Cy۶ & Cub۶	۱۸٫۴۵	۲۷	۰٫۶۸	۳٫۱۸	۰٫۱۵	۲٫۷۰	۰٫۶۸	۱۲٫۲۰	۰٫۱۷
میانگین	۱۴٫۰۸	۲۵٫۲۳	۰٫۵۳	۲٫۷۲	۰٫۱۷	۲٫۳۷	۰٫۵۳	۱۰٫۸۰	۰٫۱۹
NLWC-Cy ۱& Cub ۱	۱۶٫۴۹	۳۱٫۱	۰٫۵۳	۳٫۷۰	۰٫۱۷	۲٫۸۳	۰٫۵۳	۱۷٫۹۴	۰٫۲۲
NLWC-Cy۲ & Cub۲	۱۸٫۱۴	۳۱٫۱	۰٫۵۸	۳٫۹۸	۰٫۱۷	۲٫۹۷	۰٫۵۸	۱۸٫۷۴	۰٫۲۲
NLWC-Cy۳ & Cub۳	۱۹٫۸۲	۳۱٫۲	۰٫۶۴	۴٫۲۰	۰٫۱۶	۳٫۱۴	۰٫۶۴	۱۸٫۷۴	۰٫۲۱
NLWC-Cy۴ & Cub۴	۲۱٫۵۳	۳۱٫۲	۰٫۶۹	۴٫۳۸	۰٫۱۵	۳٫۲	۰٫۶۹	۱۸٫۵۲	۰٫۲۰
NLWC-Cy۵ & Cub۵	۲۲٫۸۹	۳۲٫۲	۰٫۷۱	۴٫۵۰	۰٫۱۴	۳٫۲۵	۰٫۷۱	۲۰٫۳۸	۰٫۲۰
NLWC-Cy۶ & Cub۶	۲۵٫۴۴	۳۲٫۲	۰٫۷۹	۴٫۵۲	۰٫۱۴	۳٫۴۴	۰٫۷۹	۲۱٫۲۳	۰٫۱۸
میانگین	۲۰٫۷۲	۳۱٫۵۰	۰٫۶۶	۴٫۱۸	۰٫۱۶	۳٫۱۴	۰٫۶۶	۱۹٫۲۶	۰٫۲۱



شکل ۴. تغییرات کرنش نظیر مقاومت فشاری بتن سبک و بتن سبک دارای نانوسیلیس.

۲.۳. مقاومت خمشی

برای تعیین مقاومت خمشی از نمونه‌های منشوری به ابعاد استاندارد $150 \times 150 \times 650$ mm استفاده شده است، که براساس ضوابط استاندارد ASTM-C۲۹۳^[۲۳] با سرعت ۱ مگاپاسکال بردقیقه و به روش مندرج در استاندارد ASTM-C۴۹۶^[۲۱] آزمایش شده است. مقادیر مقاومت خمشی نمونه‌های مورد بررسی در این پژوهش و نسبت آنها به مقاومت فشاری در جدول ۷ آورده شده است. در شکل ۵، تغییرات مقاومت خمشی در مقابل $\sqrt{f'_c}$ ترسیم و با مقادیر به دست آمده از روابط آیین‌نامه‌ی ACI مقایسه شده است. همان‌طور که در این شکل ملاحظه

شکل ۵. مقاومت خمشی بتن سبک و بتن سبک دارای نانوسیلیس.

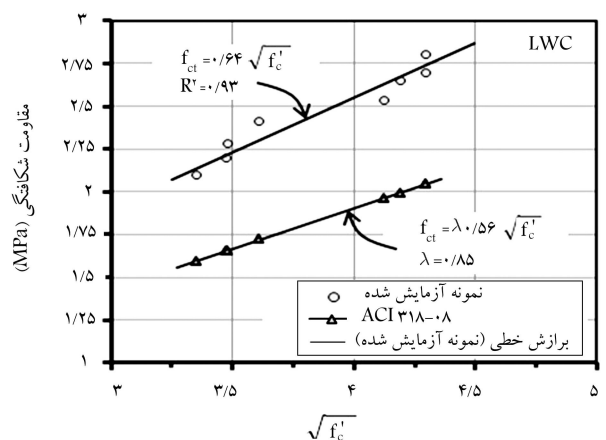
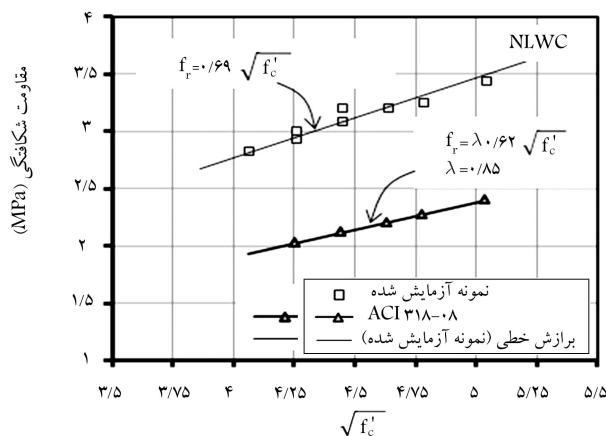
می‌شود، روند تغییرات مقاومت خمشی برای همه‌ی نمونه‌ها تقریباً مشابه است، ولی روابط آیین‌نامه‌ی ACI مقادیر کمتری به دست می‌دهد. از این نظر، رابطه‌ی ۴ با ضرایب همبستگی بالا برای تخمین تعیین مقاومت خمشی براساس مقاومت فشاری پیشنهاد می‌شود:

$$f_r = 0.93 f_c'^{0.5} \quad (4)$$

۳.۳. مقاومت کششی (شکافتگی)

برای تعیین مقاومت کششی (شکافتگی)، نمونه‌ی استوانه‌یی مطابق استاندارد ASTM-C۳۳۰^[۹] با سرعت ۱٫۲ مگا پاسکال بردقیقه و به روش مندرج در استاندارد ASTM-C۴۹۶^[۱۱] آزمایش شده است. مقادیر مقاومت کششی نمونه‌های مورد بررسی در این پژوهش و نسبت آنها به مقاومت فشاری در جدول ۷ آورده شده و ملاحظه می‌شود که افزودن نانوسیلیس ۲۶٪، مقاومت کششی را افزایش داده است. در شکل ۶، تغییرات مقاومت کششی نمونه‌های استوانه‌یی در مقابل $\sqrt{f_c'}$ ترسیم و با مقادیر به دست آمده از روابط آیین‌نامه‌ی ACI مقایسه شده است.

همان‌طور که در این شکل ملاحظه می‌شود، روند تغییرات در هر دو مقاومت (خمشی و کششی) برای همه‌ی نمونه‌ها تقریباً مشابه است، ولی روابط آیین‌نامه‌ی ACI مقادیر کمتری به دست می‌دهد. از این نظر روابط خطی ساده با ضرایب همبستگی بالا، برای تخمین تعیین مقاومت کششی (شکافتگی) براساس مقاومت فشاری پیشنهاد می‌شود. در رابطه‌ی ۵، مقدار مقاومت خمشی بتن سبک دارای



شکل ۶. مقاومت شکافتگی بتن سبک و بتن سبک دارای نانوسیلیس.

نانوسیلیس بر حسب مقاومت فشاری ارائه شده است:

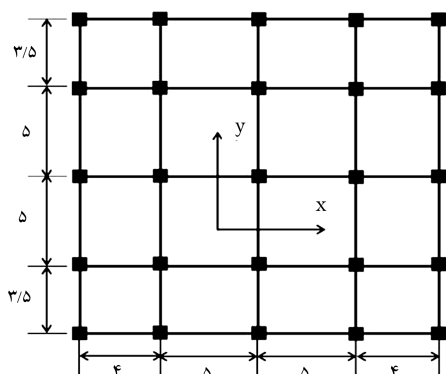
$$f_{ct} = 0.69 f_c'^{0.5} \quad (5)$$

۴. کاربرد سازه‌یی نانو - بتن سبک

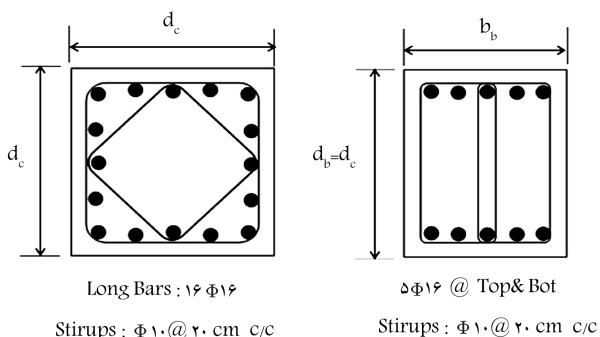
پس از تعیین خصوصیات مکانیکی بتن سبک و بتن سبک دارای نانوسیلیس، کاربرد آنها در المان‌های سازه‌یی ۴ ساختمان بتن مسلح ۶ طبقه با ارتفاع هر طبقه ۳٫۲ متر مورد ارزیابی قرار گرفت. سیستم سازه‌یی این ساختمان‌ها قاب خمشی با شکل‌پذیری متوسط و پلان متقارن، براساس ویرایش سوم استاندارد ۲۸۰۰ ایران^[۱۲] بارگذاری، تحلیل و سپس بر طبق آیین‌نامه‌ی بتن ایران (آبا) طراحی شدند^[۱۵]. تفاوت اصلی این ۴ ساختمان در به‌کارگیری نوع بتن با مشخصات داده شده در جدول ۸ است. مشخصات هندسی سازه شامل ابعاد پلان و برخی جزئیات عضوهای اصلی، که برای هر ۴ ساختمان یکسان فرض شده است، در شکل ۷ و جدول ۹ آورده شده

جدول ۸. مشخصات مصالح به‌کار رفته در طراحی سازه‌ها.

نوع بتن و میلگرد	وزن مخصوص (kg/m ³)	مقاومت فشاری / کششی (MPa)	مدول ارتجاعی (MPa)
بتن معمولی	۲۴۰۰	فشاری = ۱۸	۲۱۴۵۰
بتن سبک	۱۶۷۵	فشاری = ۱۸	۱۰۷۷۳
بتن سبک با نانوسیلیس	۱۶۷۵	فشاری = ۱۸	۱۹۲۵۹
میلگرد (مقاومت کششی)	۷۸۵۰	کششی = ۳۰۰	۲۰۰۰۰۰



پلان ساختمان‌های مورد مطالعه (اندازه دهانه‌ها به متر)



آرایش میلگردهای تیرها و ستونها

شکل ۷. پلان ساختمان و آرایش میلگردهای ستون و تیر.

جدول ۹. مشخصات هندسی سازه.

ابعاد و میلگرد (mm)					
تیرها		ستون‌ها		طبقات	
b_b	b_d	میلگرد طولی	d_c	b_c	
۴۵۰	۵۰۰	۱۶Φ۲۵	۵۰۰	۵۰۰	اول تا سوم
۴۵۰	۵۰۰	۱۶Φ۲۰	۴۵۰	۴۵۰	سوم تا ششم

جدول ۱۰. مشخصات سازه‌های مورد بررسی.

نماد سازه‌ها	ستون‌ها	تیرها	سقف‌ها	مصرفی	بتن و مصالح مصرفی	بار مرده	بار زنده
(kg/m ²)	(kg/m ²)	(kg/m ²)	(kg/m ²)	(kg/m ²)	(kg/m ²)	(kg/m ²)	(kg/m ²)
CCV ^{۵۰۰}	ب-ب	ب-ب	ب-ب	م-ب	ب-ب	۷۰۰	۲۰۰
CC ^{۵۰۰}	ب-ب	ب-ب	ب-ب	ب-س	ه-ب	۵۰۰	۲۰۰
LWC ^{۵۰۰}	ب-ب	ب-ب	ب-ب	ب-س	ه-ب	۵۰۰	۲۰۰
NLWC ^{۵۰۰}	ب-ب	ن-ب-س	ب-س	ب-س	ه-ب	۵۰۰	۲۰۰

ب-ب = بتن معمولی، م-ب = مصالح بتایی، ن-ب-س = نانو بتن سبک، ب-س = بتن سبک، ه-ب = هبلکس.

است. نخستین سازه با نماد CCV^{۵۰۰} دارای تیرها و ستون‌های بتنی معمولی و همه‌ی سقف‌ها از تیرچه بلوک با بتن معمولی ساخته و میانقاب‌ها از مصالح بتایی تشکیل شده‌اند، که بار مرده و زنده‌ی طبقات در این ساختمان به ترتیب ۷۰۰ و ۲۰۰ کیلوگرم بر مترمربع محاسبه شده است. در سازه‌ی دوم (دارای نماد CC^{۵۰۰}) با جایگزینی بتن سبک با وزن مخصوص ۱۶۷۵ کیلوگرم بر مترمکعب و بتن سبک (بدون درشت‌دانه) با وزن مخصوص ۱۲۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب در سقف تیرچه بلوک طبقات و کاربرد پانل‌های هبلکس در دیوارها با وزن ۸۰ کیلوگرم بر مترمربع، بار مرده‌ی طبقات به ۵۰۰ کیلوگرم بر مترمربع کاهش یافت. در سازه‌ی سوم، تیرهای طبقات از بتن سبک سازه‌ی با مشخصات ارائه شده در جدول ۹ تشکیل شده‌اند، که موجب کاهش بیشتر بار مرده به میزان ۵۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب در سازه شده است و نماد این سازه LW^{۵۰۰} است. تفاوت سازه‌ی چهارم با سازه‌ی سوم در این است که از بتن سبک دارای نانوسیلیس یا نانوبتن سبک در تیر طبقات استفاده شده است. نماد معرفی این سازه NLWC^{۵۰۰} است. خلاصه‌ی تفاوت این سازه‌ها در جدول ۱۰ ارائه شده است.

جدول ۱۱. نتایج تحلیل اولیه‌ی سازه‌های چهارگانه براساس استاندارد ۲۸۰۰ ایران.

نماد سازه‌ها	زمان تناوب (ثانیه)			وزن ساختمان (تن)	ضریب زلزله استاندارد ۲۸۰۰	برش پایه (کیلونیوتن)
	استاندارد ۲۸۰۰	مود اول	مود دوم			
	راستای y	راستای x				
CCV ^{۵۰۰}	۰٫۶	۰٫۹۸	۰٫۹۵	۱۶۶۹	۰٫۱۲	۱۹۸۲
CC ^{۵۰۰}	۰٫۶	۰٫۹	۰٫۸۷	۱۴۲۵	۰٫۱۲	۱۶۷۷٫۵
LWC ^{۵۰۰}	۰٫۶	۱	۱	۱۳۲۱	۰٫۱۲	۱۵۵۹٫۸
NLWC ^{۵۰۰}	۰٫۶	۰٫۹۵	۰٫۹	۱۳۲۱	۰٫۱۲	۱۵۵۹٫۸

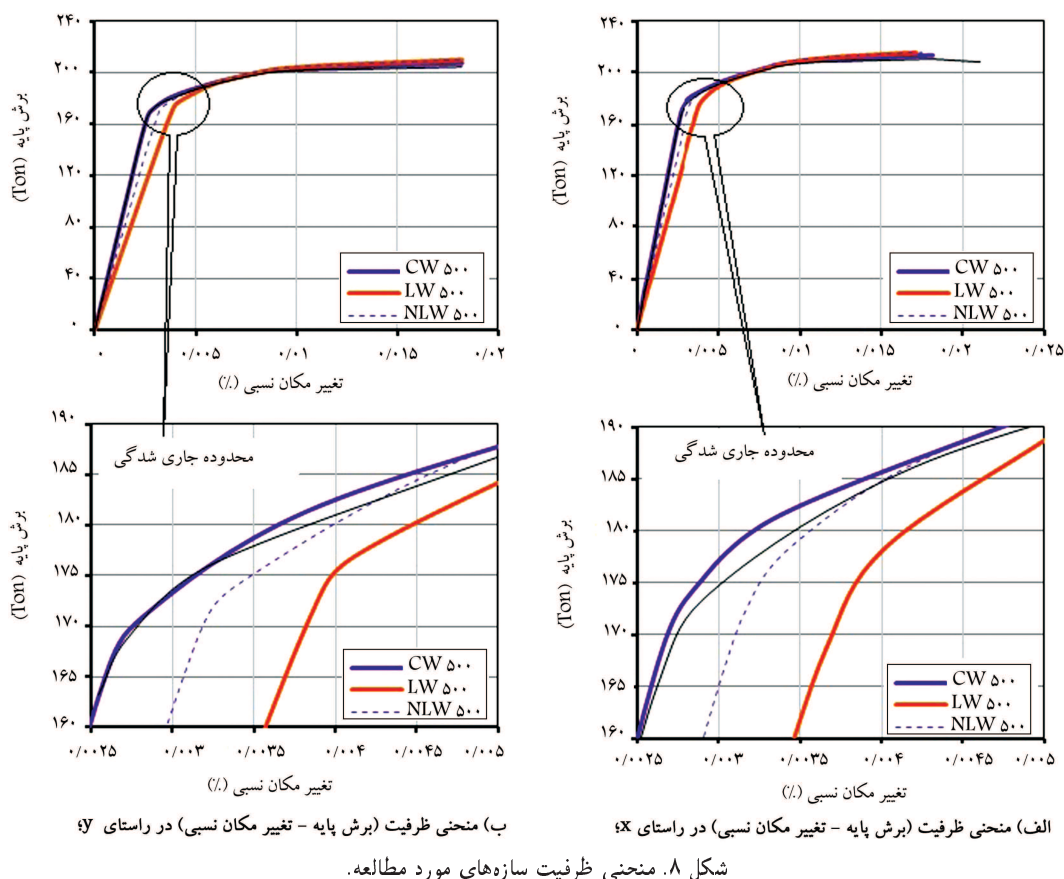
ساختمان همه‌ی این سازه‌ها با کاربری مسکونی و با اهمیت متوسط ($I=1$) در منطقه‌ی با خطر نسبی خیلی زیاد ($A = 0.35 g$) و خاک نوع II در نظر گرفته شده‌اند. سقف‌ها در همه‌ی ترازها از نوع تیرچه بلوک فرض شده است. تحلیل مربوط به طراحی همه‌ی سازه‌ها در محیط نرم‌افزار SAP ۱۴۰۰ به صورت سه بعدی و استاتیکی خطی انجام شده است. بارگذاری ثقلی سازه‌ها مطابق با مساحت ششم مقررات ملی ایران،^[۲۶] که بار مرده با منظورکردن میانقاب‌ها و بار زنده برای طبقات مطابق جدول ۱۰ و بار زنده برای بام ۱۵۰ کیلوگرم بر مترمربع در نظر گرفته شده است. خلاصه‌ی نتایج تحلیل اولیه در جدول ۱۱ ارائه شده است.

۵. تحلیل غیرخطی سازه‌ها

تحلیل‌های غیرخطی استاتیکی با استفاده از نرم‌افزار SAP ۱۴۰۰ انجام شده است. بررسی رفتار و تعیین منحنی ظرفیت سازه‌های مورد مطالعه با استفاده از روش تحلیل استاتیکی غیرخطی، تا رسیدن به تغییرمکان هدف برای سطح عملکرد ایمنی جانی انجام شده است. براساس ضوابط دستورالعمل بهسازی لرزه‌ی،^[۲۷] و FEMA ۳۵۶،^[۲۸] سطح عملکرد اعضاء مبتنی بر میزان چرخش خمیری لولاهای خمیری به‌عنوان شاخص برای سیستم‌های یک درجه آزاد در هر یک از اعضاء تعیین شد. مقدار تغییرمکان هدف با استفاده از رابطه‌ی ۶ (روش ضرایب) تعیین شده است.

$$\delta T_{arg et} = C_0 \cdot C_1 \cdot C_2 \cdot C_3 \cdot S_a \frac{T_e^2}{4\pi^2} g \quad (6)$$

که در آن، C_0 ضریب اصلاح برای مرتبطکردن تغییرمکان طیفی با تغییرمکان بام است، C_1 ضریب اصلاحی است که بیشینه‌ی تغییرمکان غیرارتجاعی موردنظر را با تغییرمکان‌های به‌دست‌آمده از طیف ارتجاعی خطی مرتبط می‌کند، C_2 ضریب اصلاحی برای نشان‌دادن تأثیر رفتار هیستریزس در تغییرمکان طیفی بیشینه‌ی سازه است، C_3 ضریب اصلاحی برای منظورکردن افزایش تغییرمکان در نتیجه‌ی آثار مرتبه‌ی دوم مرتبط با $P - \Delta$ و S_a ضریب شتاب طیفی است، که با توجه به زمان تناوب اصلی مؤثر تعیین می‌شود و T_e زمان تناوب اصلی مؤثر سازه است. برای محاسبه‌ی ضرایب C_0 تا C_3 از ضوابط دستورالعمل بهسازی لرزه‌ی ساختمان‌های موجود،^[۲۷] استفاده شد. در جدول ۱۲، مقادیر ضرایب و نقطه‌ی هدف به‌تفکیک سازه‌ها آورده شده است. باید توجه داشت که تعیین مقدار دقیق تغییرمکان هدف نیازمند انجام تحلیل بارافزون (پوش‌آور) است، بنابراین، در این مرحله مقدار تقریبی این پارامتر تعیین شده است. به منظور بررسی دقیق‌تر رفتار همه‌ی سازه‌های موردنظر در محدوده‌ی تغییرمکان‌های فراتر از تغییرمکان هدف که ممکن است تحت اثر زلزله‌های



سازه‌ی ساخته‌شده از بتن معمولی تغییر در مقدار بیشینه‌ی برش پایه و برش پایه‌ی تسلیم در محدوده‌ی غیرخطی ایجاد نمی‌کند. اما مشاهده می‌شود که مقدار برش تسلیم در سازه با بار مرده‌ی کمتر اندکی افزایش یافته است. پارامترهای به‌دست‌آمده از منحنی ظرفیت هر یک از سازه‌های تحلیل‌شده در جدول ۱۳ ارائه شده است. مقادیر شکل‌پذیری سازه‌ها با استفاده از تغییر شکل نهایی سازه براساس آئین‌نامه‌ی ۲۸۰۰ و نیز براساس نتایج تحلیل آمده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در صورت استفاده از بتن سبک، شکل‌پذیری سازه کاهش می‌یابد؛ اما با افزودن فقط ۳٪ نانوسیلیس، شکل‌پذیری سازه‌ی ساخته‌شده از بتن سبک افزایش پیدا می‌کند. به‌علاوه تغییر مکان نقطه‌ی کنترل در سازه‌ی ساخته‌شده از بتن سبک دارای نانوسیلیس، بیشتر از بتن سبک است. نسبت‌های پارامترهای به‌دست‌آمده برای مقایسه در جدول ۱۴ ارائه شده است.

۷. نتیجه‌گیری

در این نوشتار، خصوصیات مکانیکی بتن سبک دارای سبک‌دانه‌ی رس منبسط‌شده و ماسه در حالت جایگزینی ۳٪ سیمان با نانوسیلیس بررسی و نقش آن در رفتار لرزه‌یی قاب‌های ساختمانی ارزیابی شده است، که در این قسمت اهم نتایج آن آورده شده است:

۱. با افزودن نانوسیلیس به بتن سبک وزن مخصوص آن اندکی کاهش می‌یابد. همچنین کارایی آن نیز کاهش می‌یابد، که برای تأمین کارایی باید از فوق روان‌کننده‌ی بیشتری استفاده شود.

جدول ۱۲. ضرایب اصلاحی و تغییر مکان هدف در تحلیل استاتیکی غیرخطی.

مقدار ضرایب اصلاحی				نماد سازه‌ها
C_T	C_F	C_1	C_0	
۱	۱	۱	۱٫۴۲	
$\delta_{Target} (cm)$		S_a		
۱۶٫۲۶		۰٫۴۸		CC۷۰۰
۱۴٫۵۸		۰٫۵۱		CC۵۰۰
۱۶٫۹۳		۰٫۴۸		LWC۵۰۰
۱۵٫۲۹		۰٫۴۸		NLWC۵۰۰

با شدت بیشتر قرار گیرند، تغییر مکان هدف برابر ۰٫۳۵ در نظر گرفته شده است. براساس پیش استاندارد FEMA۳۵۶^[۲۸] و دستورالعمل بهسازی کلیه‌ی تحلیل‌ها تحت اثر بارهای جانبی در هر دو راستا (x, y) و در ادامه، تحلیل تحت ترکیب بار ثقلی انجام شده است. منحنی ظرفیت این سازه‌ها در شکل ۸ آمده است.

۶. منحنی ظرفیت

همان‌طور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود، منحنی ظرفیت سازه‌ها به تفکیک دارای ۳ مرحله‌ی ارتجاعی، ارتجاعی - خمیری و خمیری است. سختی سازه‌ی، که در آن از بتن سبک استفاده شده است، کمتر از سازه با بتن معمولی است، در حالی که با افزودن نانوسیلیس به بتن سبک، سختی آن افزایش یافته است، ولی همچنان از سختی سازه با بتن معمولی اندکی کمتر است. به‌علاوه کاهش بار مرده‌ی طبقات در

جدول ۱۳. مقادیر ضریب شکل پذیری سازه‌ها، به دست آمده از تحلیل غیرخطی و استاندارد ۲۸۰۰.

NLW۵۰۰	LW۵۰۰	CW۵۰۰	CW۷۰۰		
۴٫۵۶	—	۵٫۰۲	۵٫۵۴	تحلیل در راستای محور x	روش استاندارد
۴٫۷۹	—	۵٫۱۷	۶٫۱۷	تحلیل در راستای محور y	۲۸۰۰
۲۸۵۷	۲۴۰۲	۳۳۳۷	۳۳۰۲	سختی (تن بر متر)	
۱۷۵۴	۱۷۵۰	۱۷۰۹٫۹	۱۷۱۲٫۸	برش پایه‌ی نظیر تسلیم (کیلونیوتن)	تحلیل غیرخطی در
۰٫۰۶۷	۰٫۰۷۷	۰٫۰۵۵	۰٫۰۵۷	Δx (متر)	راستای محور X
۵٫۰۴	۴٫۲۳	۶٫۳۶	۷٫۰۴	$\mu_{\Delta} = \Delta_u / \Delta_y$	
۲۸۲۲	۲۳۳۵	۳۳۶۵	۳۳۷۶	سختی (تن بر متر)	
۱۷۰۶٫۹	۱۷۳۶٫۴	۱۶۷۷٫۵	۱۶۵۸	برش پایه‌ی نظیر تسلیم (کیلونیوتن)	تحلیل غیرخطی در
۰٫۰۶۵	۰٫۰۸	۰٫۰۵۴	۰٫۰۵۲	Δy (متر)	راستای محور Y
۵٫۳۴	۴٫۳۸	۶٫۴۸	۶٫۷۳	$\mu_{\Delta} = \Delta_u / \Delta_y$	

جدول ۱۴. مقایسه‌ی عوامل رفتار لرزه‌ی سازه‌ها، به دست آمده از تحلیل غیرخطی (درصد).

NLW۵۰۰	NLW۵۰۰	NLW۵۰۰	LW۵۰۰	CW۵۰۰	پارامترهای رفتاری
LW۵۰۰	CW۷۰۰	CW۵۰۰	CW۷۰۰	LW۵۰۰	
+۱۸٫۹	-۱۳٫۵	-۲۸٫۰	-۱۴٫۴	-۲۷٫۳	راستای x
+۲۰٫۸	-۱۶٫۴	-۳۰٫۶	-۱۶٫۰	-۳۰٫۸	راستای y
+۱۹٫۹	-۱۵٫۰	-۲۹٫۳	۱۵٫۲	۲۹٫۱	میانگین
+۰٫۲	+۲٫۴	+۲٫۳	-۲٫۶	+۲٫۲	راستای x
-۱٫۷	+۲٫۹	+۳٫۵	+۱٫۷۵	+۴٫۷	راستای y
۰٫۹۵	۲٫۶۵	۳٫۰	۲٫۱۸	۳٫۴۵	میانگین
+۱۸٫۴	-۲۷٫۶	-۳۲٫۶	-۲۰٫۱	-۳۸٫۸	راستای x
+۲۲٫۸	-۲۰٫۱	-۳۴٫۹	-۱۶٫۹	-۳۲٫۴	راستای y
۲۰٫۶	۲۳٫۹	۳۳٫۸	۱۸٫۵	۳۵٫۶	میانگین

۲. سبک بدون نانوسیلیس به دست آمد. به علاوه مقادیر به دست آمده از آزمایش در مقایسه با مقادیر محاسبه شده از رابطه‌ی ACI ، که برای هر دو نوع بتن به یک نتیجه انجامیده است، بیشتر شده است. بنابراین با برآزش داده‌های به دست آمده از این پژوهش، که دارای ضریب همبستگی خوبی است، رابطه‌ی تعیین مدول ارتجاعی بتن سبک دارای نانوسیلیس پیشنهاد می‌شود.

۳. میانگین مقاومت شکافتگی بتن سبک نیز با افزودن نانوسیلیس ۲۶٪ بیشتر می‌شود و رابطه‌ی تخمین مقاومت شکافتگی براساس مقاومت فشاری تخمین زده شده است.

۴. از بتن سبک و بتن سبک دارای نانوسیلیس می‌توان در اعضای سازه‌ی با تمهیداتی که نیازمند بررسی بیشتر است، استفاده کرد.

۱. با افزایش نسبت آب به سیمان، مقاومت فشاری بتن سبک دارای نانوسیلیس و بتن سبک بدون نانوسیلیس کاهش می‌یابد، ولی مقاومت بتن سبک دارای نانوسیلیس، با افزایش نسبت آب به سیمان، با نرخ کمتری کاهش می‌یابد.

۲. نسبت مقاومت فشاری استوانه‌ی به مکعبی استاندارد برای بتن سبک برابر ۰/۵۳ و برای بتن سبک دارای نانو سیلیس برابر ۰/۶۶ به دست آمد.

۳. در صورت افزودن نانوسیلیس، مقاومت فشاری استوانه‌ی و مکعبی بتن سبک به ترتیب ۴۷، ۲۴ درصد افزایش می‌یابد و شکست نمونه‌های فشاری همانند بتن معمولی به شکست سنگ‌دانه وابسته است.

۴. میانگین مدول ارتجاعی بتن سبک با افزودن نانو سیلیس ۷۹٪ بیشتر از بتن

منابع (References)

1. Lo, T.Y., Cui, H.Z. and Li, Z.G. "Influence of aggregate pre-wetting and fly ash on mechanical properties of lightweight concrete", *Waste Management*, **24**(4), pp. 333-338 (2004).
2. Sartiss, C. and Brentson, L. "Lighthweight Concrete", Shekarchizade, M., et. al., Tehran University (2009) (Translated in Farsi).
3. ACI 213R-87 "Guide for structural lightweight aggregate concrete- ACI 213R-87", American Concrete Institute, Detroit, USA (1999).
4. Ramezani pour, A.A., Parhizkar, T. and Taheri, A. "Implementation of microSilica", Building and Housing Research Center (BHRC), Report No. 241, Tehran, I.R. Iran (1998).
5. YE, Q., Zhang, Z., SHENG, L. and Chen, R. "A comparative study on the pozzolanic activity between nano-SiO₂ and silica fume", *Journal of Wuhan University of Technolog*, **21**(3), pp. 153-157 (2006).
6. Sadr momtazi, A., Fasihi, A., Balalaei, F. and Haghi, A.K. "Investigation of mechanical and physical properties of mortars containing silica fume and nano-Sio₂", *3rd International Conference on Concrete & Development*, Tehran, Iran, pp. 1153-1161 (2009).
7. Ramezani poor, A.A. "Cement replacement material", Building and Housing Research Center (BHRC), Report No. 22. Tehran, I.R. Iran (2007).
8. Zare, K. "Use of super-plasticizers in concrete", Civil Eng. Department Amirkabir Univ. of Tech., pp. 31-44 (1989).
9. ASTM C330 "Standard specification for lightweight aggregates for structural concrete", **04.02**, American Society for Testing and Materials, USA (2004).
10. ACI 211.2-98 "Standard practice for selecting proportions for structural lightweight concrete- ACI 211.2-98", American Concrete Institute, Detroit, USA (1998).
11. Shekarchizade, M.A., Mahootian, L. and Ashoori, E. "Guide lines for use of lightweight Lica gravel", Lica Co. Tehran, I.R. Iran (2009).
12. ASTM C127 "Density, relative density (specific gravity) and absorption of coarse aggregate", **04.02**, American Society for Testing and Materials, USA (2001).
13. ASTM C136 "Sieve analysis of fine and coarse aggregates", **04.02**, American Society for Testing and Materials, USA (2001).
14. ASTM C33 "Standard specification for concrete aggregates", **04.02**, American Society for Testing and Materials, USA (2003).
15. ACI 211.2-R-98 "Standard practice for selecting proportions for structural lightweight concrete", American Concrete Institute, Detroit, USA (1998).
16. ASTM C192 "Making and curing concrete test specimens in the laboratory", **04.02**, American Society for Testing and Materials, USA (2002).
17. Poorshahram, M. "Design, construction and mechanical properties of self-compact lightweight concrete containing nanoparticles", MSc Dissertation, Sh. Bahonar University, Kerman, I.R. Iran (2007).
18. ASTM C143 "Slump of hydraulic-cement concrete", **04.02**, American Society for Testing and Materials, USA (2003).
19. ASTM C567 "Determining density of structural lightweight concrete", **04.02**, American Society for Testing and Materials, USA (2000).
20. ASTM C39 "Compressive strength of cylindrical concrete specimens", **04.02**, American Society for Testing and Materials, USA (2003).
21. ASTM C496 "Splitting tensile strength of cylindrical concrete specimens", **04.02**, American Society for Testing and Materials, USA (2004).
22. ASTM C617 "Capping cylindrical concrete specimens", **04.02**, American Society for Testing and Materials, USA (2003).
23. ASTM C293 "Flexural strength of concrete (using simple beam with center-point loading)", **04.02**, American Society for Testing and Materials, USA (2002).
24. Building and Housing Research Center Iranian, "Code of practice for seismic design of building", Standard 2800, Third Version, Tehran, I.R. Iran (2005).
25. Planning and Management Organization of Iran, "Iranian concrete code of practice", First Revision, No. 120, Tehran, I.R. Iran (2001).
26. Ministry of Housing and Urban Planning, "Loads applied to the buildings", Part 6 of National Building Code, Tehran, I.R. Iran (2002).
27. Planning and Management Organization of Iran, "Guide lines for the seismic rehabilitation of existing buildings", No. 360, Tehran, I.R. Iran (2007).
28. FEMA-356 "Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings", American Society of Civil Engineers, USA (2000).