

مقاومت فشاری و شکل‌پذیری ستون‌های بتن مسلح ساخته شده از سنگدانه‌های سبک طبیعی تحت بار خارج از محوری

محمد رضا اصفهانی استاد گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد
 علی کدخدایی کارشناس ارشد عمران- سازه، دانشگاه فردوسی مشهد

چکیده

در این مقاله مقاومت و شکل‌پذیری ستون‌های بتن مسلح ساخته شده از سنگدانه‌های سبک طبیعی بررسی می‌شود. بدین منظور تعداد ۱۲ عدد ستون با مقطع مربع شکل ساخته و آزمایش شد. در این نمونه‌ها پارامترهای متغیر شامل مقاومت بتن سبک، فاصله تنگ‌ها و نیز شکل آنها در مقطع بوده است. خارج از محوری بار وارده برابر ۶۰ میلی‌متر بوده است. مشاهدات آزمایش و تجزیه تحلیل نتایج، تأثیر مثبت عمل دورگیری آرماتورهای عرضی در افزایش مقاومت نهایی و شکل‌پذیری ستون‌ها را نشان می‌دهد. نتایج این آزمایشات با روابط آیین‌نامه ACI برای بتن معمولی مقایسه شده است. این مقایسه نشان می‌دهد که ستون‌های بتنی ساخته شده از سنگ دانه‌های سبک طبیعی در صورت طرح اختلاط و عمل‌آوری مناسب بتن و بهره‌گیری مناسب از آرماتورهای عرضی می‌تواند در سازه‌ها بخوبی مورد استفاده قرار گیرد.
 کلمات کلیدی: تن سبک، تنگ، ستون، شکل‌پذیری، مقاومت، لنگر خمشی.

Strength and Ductility of Reinforced Concrete Columns Made of Lightweight Aggregates under Eccentric Loading

M. R. Esfahani Ferdowsi University of Mashhad
 A. Kadhkodaee Ferdowsi University of Mashhad

Abstract

In this research, the strength and ductility of reinforced concrete columns made of lightweight aggregates are studied. Twelve square reinforced concrete columns were manufactured and tested. In the specimens, the shape and spacing of transverse reinforcement and compressive strength of specimens varied. For all specimens, the eccentricity of axial loading was 60mm. Test results show that the confinement of transverse reinforcement has a positive effect on ultimate strength and ductility. Test results have been compared with the provisions of ACI Code for normal strength concrete. The comparison shows that the reinforced concrete columns made of natural lightweight aggregates can be used in structures if they include appropriate transverse reinforcement and have a good mix design.

Key words: Ductility, Lightweight concrete, Lightweight aggregate, Strength, Reinforced columns.

۱- مقدمه

سازه‌های بتنی از مقاوم‌ترین و ایمن‌ترین سازه‌ها بشمار می‌روند. لیکن وزن واحد حجم بالای بتن مصرفی باعث افزایش بار مرده سازه شده و پیامد آن افزایش بارهای جانبی ناشی از زلزله می‌باشد. بنابراین استفاده از بتن سبک می‌تواند نقش بسزایی در کاهش نیروهای وارده بر سازه داشته باشد.

در دهه گذشته، که به کمک مواد افزودنی و فوق روان کننده‌ها امکان تولید بتن سبک با مقاومت بالا فراهم شده، استفاده از بتن سبک در ساخت دال‌ها، تیرها و ستون‌ها گسترش زیادی یافته است. در پل‌ها که وزن ستون در ایجاد بارهای جانبی نسبتاً قابل ملاحظه است، استفاده از بتن سبک در کاهش بارهای جانبی تأثیر زیادی خواهد داشت [۱]. همچنین در مواردی که به منظور مرمت یا تقویت ستون، ابعاد ستون و در نتیجه وزن سازه به مقدار زیادی افزایش می‌یابد، استفاده از بتن سبک مناسب خواهد بود [۱].

در این تحقیق تعداد ۱۲ عدد ستون بتنی با استفاده از سنگدانه‌های سبک طبیعی که منشاء آتشفشانی دارند ساخته شد. این ستون‌های بتنی، مسلح به آرماتورهای طولی و عرضی بوده و با مقاومت‌های مختلف ساخته شده‌اند. تأثیر پارامترهای مهم مانند درصد آرماتور عرضی، فاصله و آرایش آنها و همچنین مقاومت بتن سبک بر رفتار عضو مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

۲- اثر دورگیری آرماتورهای عرضی

هنگامیکه بتن غیر مسلح تحت تنش‌های فشاری به مقاومت شکست نزدیک می‌شود، در آن کرنش‌های جانبی بزرگی در اثر تشکیل و انتشار ترک‌های طولی ایجاد می‌شود. این امر منجر به ناپایداری ناحیه فشاری و در نتیجه شکست می‌گردد. آرماتورهای بسته عرضی در جهت محدود کردن انبساط جانبی بتن عمل کرده و باعث می‌شوند که عضو بتن مسلح، توانایی تحمل تنش‌های فشاری بیشتر و بزرگتری را داشته باشد [۴-۲].

دورگیری کردن بتن باعث می‌شود که شیب قسمت دوم منحنی تنش-کرنش بتن یعنی قسمت نزولی آن کم شده و در نتیجه کرنش مرحله نهایی افزایش یابد. به این ترتیب سطح زیر منحنی تنش-کرنش بتن که مبین قابلیت جذب انرژی است افزایش یافته و در نتیجه شکل‌پذیری افزایش می‌یابد. بنابر این افزایش مقاومت و قابلیت جذب انرژی و شکل‌پذیری از مزایای مهم آرماتورهای عرضی می‌باشد [۵، ۶].

اخیراً، اثر عامل دورگیری در رفتار ستون‌های ساخته شده از بتن سبک با مقاومت معمولی و بالا نیز مورد مطالعه قرار گرفته و مدل‌هایی برای در نظر گرفتن این عامل در مقاومت و شکل‌پذیری این ستون‌ها ارائه شده است [۷، ۸، ۹].

Mervyn و همکاران [۱] نشان دادند که آیین نامه ACI [۹] مدول الاستیسیته بتن سبک را نسبتاً مناسب پیش‌بینی می‌کند اگر چه بنظر می‌آید مقدار واقعی آن کمتر از مقدار پیش‌بینی شده است. طبق نتایج Mervyn و همکاران [۱] در صورتی که ستون تحت خمش قرار گیرد، اثر دورگیری آرماتور جانبی روی مقاومت فشاری ستون ناچیز می‌باشد.

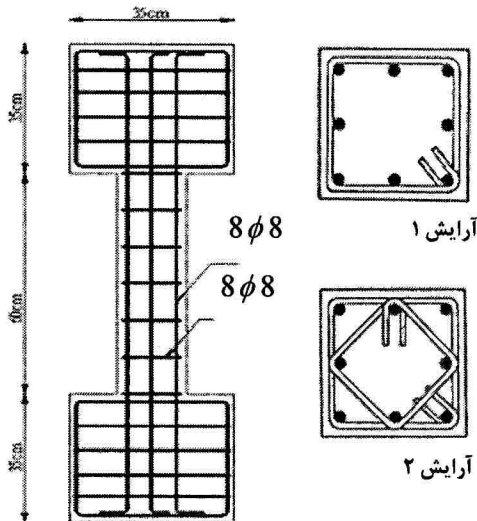
نتایج آزمایشگاهی [۱] نشان داد که کرنش بتن سبک در شکست حدود ۰/۰۰۲۵ است که ۵۰ درصد نسبت به بتن معمولی کاهش دارد. همچنین تفاوت قابل ملاحظه‌ای در مورد جذب انرژی ستون‌های ساخته شده از بتن سبک نسبت به بتن معمولی مشاهده نگردید.

در مورد اثر دورگیری آرماتور جانبی، خالو و همکاران [۷] به کمک نتایج آزمایش روی ستون‌های فشاری نشان دادند که بهبود رفتار ستون‌های ساخته شده از بتن سبک ناشی از آرماتور جانبی با افزایش مقاومت فشاری بتن کاهش می‌یابد.

در مورد اعضا بتن مسلح تحت نیروی خارج از محوری، نقش فولادهای عرضی در ایجاد دورگیری کمتر می‌شود [۱۰]. از آنجا که کرنش در ارتفاع مقاطع تحت بار محوری و لنگر خمشی متغیر است، تنش‌های ایجاد شده نیز متغیرند. در تارهای انتهایی وجه فشاری بیشترین کرنش فشاری و در محور خنثی کرنش فشاری صفر می‌باشد. همین امر سبب می‌گردد که تمایل مقطع به انبساط جانبی (که ناشی از فشار محوری است و بستگی به ضریب پواسون دارد) کاهش یافته و بنابراین تنش‌های کششی تنگ‌ها نسبت به حالتی که کل مقطع تحت فشار یکنواخت است کم شود (به عبارت دیگر نقش فولادهای جانبی در عمل دورگیری بتن هسته کاهش می‌یابد). با توجه به کمبود نتایج آزمایشگاهی در مورد اثر دورگیری آرماتور عرضی در ستون‌های با بار خارج از محوری و همچنین لزوم مطالعه بیشتر در مورد استفاده از بتن سبک در ستون‌های بتن آرمه، یک کار آزمایشگاهی شامل ۱۲ نمونه عضو تحت بار خارج از محوری به شرح زیر صورت گرفت.

۳- کار آزمایشگاهی

اندازه‌گیری شده است. علت تفاوت وزن مخصوص‌ها استفاده از ریزدانه بیشتر در بتن‌های با مقاومت بالاتر است.



شکل ۱- جزئیات ستون‌های آزمایش شده

۴- مخلوط بتن سبک

برای تولید بتن سبک از بین سنگدانه‌های سبک موجود در کشور مناسب‌ترین سنگدانه پوکه معدنی معادن فاروج تشخیص داده شد. شایان ذکر است که جنس این سنگدانه از نوع آتشفشانی می‌باشد. ترکیبات شیمیایی این سنگدانه در جدول (۲) نشان داده شده است.

جهت بررسی رفتار ستون‌های ساخته شده از بتن سبک تعداد ۱۲ عدد ستون ساخته شده و توسط جک هیدرولیکی موجود در آزمایشگاه بتن دانشکده مهندسی تحت آزمایش قرار گرفتند. مقاومت بتن مورد استفاده این ستون‌ها در سه رده 22MPa ، 27MPa و 33MPa بوده است.

هدف اصلی از انجام این کار آزمایشگاهی مشاهده رفتار ستون‌های بتن مسلح ساخته شده از سنگ دانه‌های سبک طبیعی تحت اثر بار خارج از محوری با در نظر گرفتن اثرات دورگیری جانبی می‌باشد. متغیرهای مورد نظر در این آزمایش‌ها، فاصله و شکل آرماتورهای عرضی و مقاومت فشاری بتن می‌باشد. شکل (۱) و جدول (۱) جزئیات ستون‌های آزمایش شده را نشان می‌دهند.

جهت بررسی تأثیر فاصله آرماتور عرضی بر رفتار ستون‌ها از دو فاصله ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌متری برای تنگ‌ها استفاده شده است. خارج از محوری بار وارده بر انتهای ستون‌ها برابر ۶۰ میلی متر و درصد آرماتورهای طولی در تمامی نمونه‌ها ثابت بوده و قطر آنها برابر ۸ میلی متر بوده است. وزن مخصوص بتن در نمونه‌ها با یکدیگر متفاوت بوده و برای نمونه‌های با مقاومت ۲۲ مگاپاسکال برابر ۱۹۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب، برای نمونه‌های با مقاومت ۲۷ مگاپاسکال برابر ۱۹۲۰ کیلوگرم بر متر مکعب و برای مقاومت ۳۳ مگاپاسکال برابر ۱۹۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب

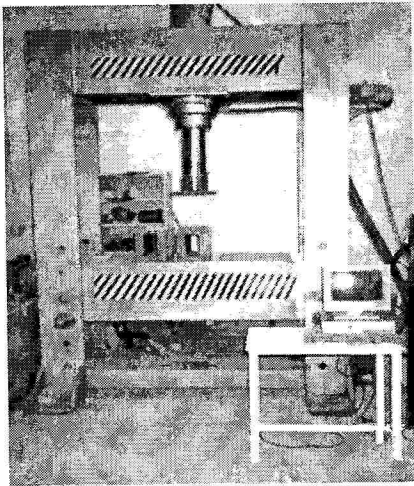
جدول ۱- مشخصات نمونه‌های ساخته شده

شماره نمونه	f'_c MPa	آرماتورهای طولی		آرماتورهای عرضی			تنگ
		ρ_l	f_y MPa	ρ_s	f_{yt} MPa	S mm	
C-1	۳۳/۲	۱/۷۸۷	۳۰۰	۰/۹۵	۳۰۰	۵۰	(۱)
C-2	۳۳	۱/۷۸۷	۳۰۰	۱/۹	۳۰۰	۵۰	(۲)
C-3	۳۲/۵	۱/۷۸۷	۳۰۰	۰/۹۵	۳۰۰	۱۰۰	(۱)
C-4	۳۲/۳	۱/۷۸۷	۳۰۰	۱/۹	۳۰۰	۱۰۰	(۲)
C-5	۲۲/۵	۱/۷۸۷	۳۰۰	۰/۹۵	۳۰۰	۵۰	(۱)
C-6	۲۲/۳	۱/۷۸۷	۳۰۰	۱/۹	۳۰۰	۵۰	(۲)
C-7	۲۱/۹	۱/۷۸۷	۳۰۰	۰/۹۵	۳۰۰	۱۰۰	(۱)
C-8	۲۱/۹	۱/۷۸۷	۳۰۰	۱/۹	۳۰۰	۱۰۰	(۲)
C-9	۲۷/۳	۱/۷۸۷	۳۰۰	۰/۹۵	۳۰۰	۵۰	(۱)
C-10	۲۷/۲	۱/۷۸۷	۳۰۰	۱/۹	۳۰۰	۵۰	(۲)
C-11	۲۶/۵	۱/۷۸۷	۳۰۰	۰/۹۵	۳۰۰	۱۰۰	(۱)
C-12	۲۶/۴	۱/۷۸۷	۳۰۰	۱/۹	۳۰۰	۱۰۰	(۲)

جدول ۲- ترکیبات شیمیایی پوکه معدنی فاروج

ترکیب شیمیایی	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	TiO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	L.O.I
درصد	۵۸/۱۲	۱۸/۰۹	۵/۳۷	۱/۵۵	۰/۲۶	۱/۳۱	۲/۹۲	۵/۸۵	۴/۸۷	۱/۴۲

بهتری را به وضوح از خود نشان دادند. در این نمونه‌ها علی‌رغم افزایش تغییر مکان، کاهش نیرو بسیار کم بود. در ستون‌های با فاصله تنگ ۱۰۰ میلی‌متر شکل پذیری چندانی مشاهده نشد.



شکل ۲- دستگاه آزمایش

جدول ۳- مقاومت نهایی نمونه‌های آزمایش شده

شماره نمونه	f_c , MPa	P_{test} , kN	M_{test} , kN.m
C-1	۳۳/۲	۲۳۴	۱۸/۰۴
C-2	۳۳	۲۳۷	۱۹/۱۹
C-3	۳۲/۵	۲۲۰	۱۶/۷۲
C-4	۳۲/۳	۲۲۳	۱۷/۱۷
C-5	۲۲/۵	۱۹۸	۱۵/۲۲
C-6	۲۲/۳	۲۰۲	۱۵/۶۷
C-7	۲۱/۹	۱۸۲	۱۳/۷۵
C-8	۲۱/۹	۱۸۵	۱۴/۱۱
C-9	۲۷/۳	۲۱۴	۱۶/۵۰
C-10	۲۷/۲	۲۲۰	۱۷/۰۷
C-11	۲۶/۵	۱۹۹	۱۵/۰۶
C-12	۲۶/۴	۲۰۱	۱۵/۴۸

* مقادیر لنگرها با توجه به خارج از محوری واقعی پس از تغییر شکل ستون محاسبه شده است.

پس از خرد کردن پوکه‌ها باید آنها را جهت استفاده در بتن دانه‌بندی کرد. بدین منظور پوکه‌ها در سه اندازه: الف) ریز دانه با ابعاد کوچکتر از ۴/۸ میلی‌متر، ب) درشت دانه نخودی با ابعاد بین ۴/۸ تا ۱۰ میلی‌متر و ج) درشت دانه بادامی با ابعاد بین ۱۰ تا ۱۹ میلی‌متر تهیه شدند. با توجه به توصیه استاندارد 330 - ASTM C مصالح سنگی درشت دانه بصورت ترکیبی از ۳۰٪ وزنی دانه‌های بادامی و ۷۰٪ وزنی دانه نخودی در نظر گرفته می‌شود. سپس با تغییر نسبت ریز دانه به درشت دانه، دانه بندی‌های مختلف جهت رسیدن به مقاومت‌های متفاوت بدست آمد.

۵- آزمایش نمونه‌ها

پس از گذشت ۲۸ روز از بتن ریزی، نمونه‌ها توسط جک هیدرولیکی موجود آزمایش شدند. یک سیستم رایانه‌ای دریافت داده‌ها، نیروی وارده به نمونه را در هر لحظه ضبط نمود. در شکل (۲) دستگاه آزمایش نمایش داده شده است. سرعت بارگذاری دستگاه بوسیله شیر مخصوصی کنترل شد. پس از تنظیم دستگاه توسط شیر مخصوص به آرامی بارگذاری شروع شده و همزمان با آن تغییر مکان میانه ارتفاع ستون توسط تغییر مکان سنجی که در محل مذکور نصب شده اندازه‌گیری شد. با افزایش بار به صورت تدریجی تغییر مکان‌ها نیز ثبت شد. سرعت بارگذاری تقریباً برابر ۵۰ کیلوگرم بر ثانیه بود.

تمام ستون‌ها رفتار تقریباً مشابهی را تا رسیدن به بار نهایی از خود نشان دادند. با اعمال بار وارده، ستون به آرامی شروع به تغییر مکان نمود و در هنگام رسیدن به بار نهایی شدت تغییر مکان در میانه ارتفاع ستون افزایش پیدا کرد. با رسیدن ستون به بار نهایی در یک لحظه افزایش نیروی وارده متوقف شد و تغییر مکان به مقدار زیادی افزایش یافت.

ستون‌هایی که در آنها فاصله تنگ‌ها ۵۰ میلی‌متر بود رفتار شکل‌پذیرتری از خود نشان دادند. بدین معنی که با رسیدن به بار نهایی و افزایش شدید تغییر مکان، از نیروی محوری مقدار کمی کاسته شد. همچنین نمونه‌هایی که در آنها از تنگ‌های لوزی شکل و با فاصله ۵۰ میلی‌متر استفاده شده بود، رفتار

۶- نتایج آزمایش‌ها

نیروی حداکثر قرائت شده در لحظه شکست همان مقاومت نهایی عضو تحت خراج از محوری ثابت می‌باشد. در جدول (۳) مقاومت نهایی هر یک از اعضاء آورده شده است.

منحنی اثر متقابل فشار و خمش برای ستون‌های مورد آزمایش بر اساس آیین نامه ACI برای مقاومت‌های مختلف در شکل (۳) رسم شده است. همانطور که در نمودارهای شکل (۳) ملاحظه می‌شود، نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهند که خارج از محوری واقعی بار در نمونه‌ها بیش از مقدار ۶۰ میلی‌متر بوده یا به عبارتی $\epsilon_1 > 0.4$ می‌باشد. علت این امر تغییر شکل جانبی عضو تحت بار و افزایش خارج از محوری میانه ارتفاع عضو می‌باشد. مقایسه نتایج آزمایش‌ها با نمونه‌های رسم شده نشان می‌دهند که روابط آیین نامه ACI مقاومت نهایی را بصورت محافظه کارانه پیش‌بینی می‌کند. یکی از دلایل مهم این امر تأثیر دورگیری آرماتورهای عرضی در افزایش مقاومت نهایی می‌باشد.

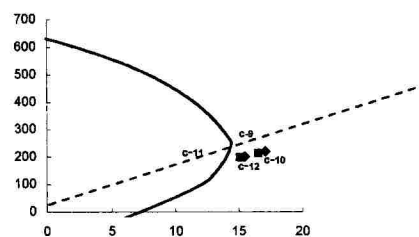
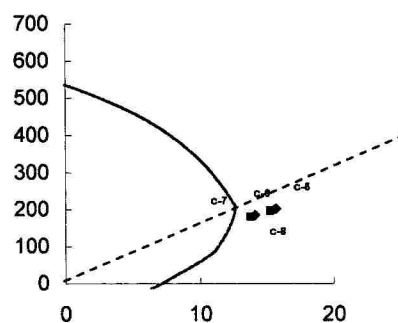
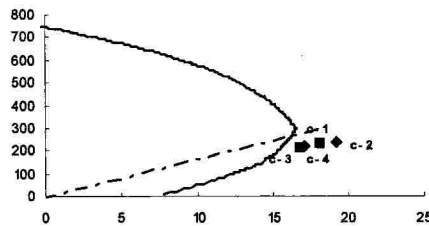
از مقایسه نتایج نمونه‌های C-1 و C-2 ملاحظه می‌شود که نمونه C-2 نسبت به نمونه C-1 دارای ظرفیت باربری بیشتری است. این موضوع در مقایسه نمونه‌های C-5 با C-6 و C-9 با C-10 به سبب تأثیر شکل ظاهری آرماتور عرضی به وضوح قابل مشاهده است. هنگامی که از تنگ‌های لوزی شکل استفاده می‌شود، دورگیری هسته بتن بهبود یافته و در نتیجه مقاومت و شکل‌پذیری افزایش می‌یابد. با دقت در نمودارها همچنین ملاحظه می‌شود که تأثیر آرماتور عرضی در ظرفیت باربری با افزایش فاصله تنگ‌ها (از ۵۰ میلی‌متر به ۱۰۰ میلی‌متر) کمتر می‌شود. اثر فاصله تنگ‌ها بر ظرفیت باربری و رابطه بار-تغییر مکان ستون‌ها در نمودارهای شکل (۴) نیز مشخص است.

۷- مقایسه نتایج بدست آمده از آزمایش‌ها با روابط

آیین‌نامه ACI [۹]

براساس آیین‌نامه [۹] ACI مقادیر مقاومت نهایی ستون‌های آزمایش شده محاسبه و در جدول (۴) ارائه شده است.

همچنین نتایج آزمایشگاهی و نسبت مقاومت‌های آزمایشی به مقادیر محاسباتی ACI در جدول آورده شده است. نتایج P_{test} / P_{ACI} نشان می‌دهند که برای ستون‌های ساخته شده از بتن سبک می‌توان از روابط محاسباتی ACI استفاده کرد.



شکل ۳- نمودارهای اندرکنش نیروی محوری و لنگر خمشی و نتایج آزمایش

۸- نتیجه‌گیری

در این تحقیق مقاومت ستون‌های ساخته شده از سنگدانه‌های سبک طبیعی تحت بار خارج از محوری بررسی و نتایج آزمایشگاهی با روابط آیین نامه ACI مقایسه شد. نتایج تحقیق نشان می‌دهند که: ۱- روابط طراحی آیین نامه آمریکایی ACI 318-02 ارائه شده برای پیش‌بینی مقاومت فشاری ستون‌های ساخته شده از بتن معمولی، برای بتن سبک نیز بخوبی قابل استفاده می‌باشند.

۲- استفاده از آرماتور عرضی به مقدار زیادی رفتار ستون‌های ساخته شده از بتن سبک را تحت تأثیر قرار می‌دهد و با کم کردن فاصله آنها و انتخاب شکل مناسب می‌توان به مقاومت‌های بالا و نیز بهبود شکل‌پذیری دست یافت.

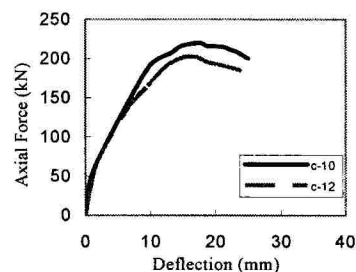
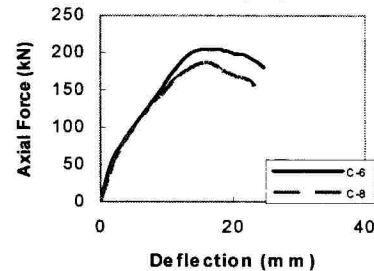
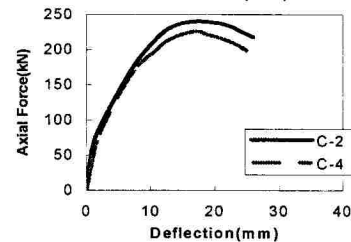
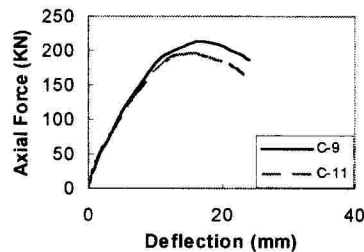
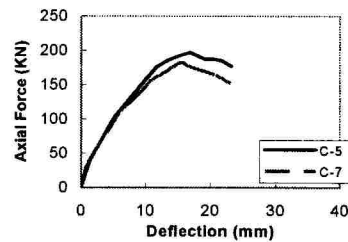
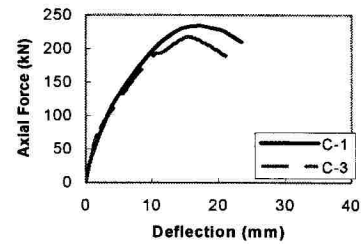
۳- برخلاف برخی گزارش‌های گذشته، نتایج آزمایشگاهی این مطالعه نشان می‌دهند که، همانند بتن معمولی، آرماتور عرضی می‌تواند مقاومت فشاری و شکل‌پذیری ستون‌های ساخته شده از بتن سبک را که همزمان تحت بار محوری و لنگر خمشی قرار دارند، افزایش دهد.

جدول ۴ - مقایسه نتایج آزمایش‌ها با آیین‌نامه ACI

شماره نمونه	f'_c (MPa)	P_{test} (kN)	P_{ACI} (kN)	P_{test}/P_{ACI}
C-1	۳۳/۲	۲۳۴	۲۰۸	۱/۱۲
C-2	۳۳	۲۳۷	۲۰۸	۱/۱۴
C-3	۳۲/۵	۲۲۰	۲۰۸	۱/۰۶
C-4	۳۲/۳	۲۲۳	۲۰۸	۱/۰۷
C-5	۲۲/۵	۱۹۸	۱۶۸	۱/۱۸
C-6	۲۲/۳	۲۰۲	۱۶۸	۱/۲۰
C-7	۲۱/۹	۱۸۲	۱۶۸	۱/۰۸
C-8	۲۱/۹	۱۸۵	۱۶۸	۱/۱۰
C-9	۲۷/۳	۲۱۴	۱۸۶	۱/۱۵
C-10	۲۷/۲	۲۲۰	۱۸۶	۱/۱۸
C-11	۲۶/۵	۱۹۹	۱۸۶	۱/۰۷
C-12	۲۶/۴	۲۰۱	۱۸۶	۱/۰۸

مراجع

- [1] Mervyn J. Kowalsky, M. J. Nigel P. and Frieder S., 1999, "Shear and Flexural Behavior of Lightweight Concrete Bridge Columns in Seismic Regions," ACI Structural Journal, Vol. 96, No. 1, pp. 136-148.
- [2] Martinez, S., Nilson, A. H., and Slate, F. O., 1984, "Spirally Reinforced High Strength Concrete Columns," ACI Journal, Proceedings V. 81, No. 9, Sept-Oct., pp. 431-442.
- [3] Bjerkeli, L., Tomaszewicz, A., 1990, "Deformation Properties and Ductility of High-Strength Concrete," Proceedings of Second International Symposium on Utilization of High-Strength Concrete, University of California, Berkeley, pp. 215-238.
- [4] El-Dash, K. M., and Ahmad, S. H., 1995, "A Model for Stress-Strain Relationship of Spirally Confined Normal and High Strength Lightweight Concrete Columns," Magazine of Concrete Research, V.47, No. 171, pp. 67-74.
- [5] Soatcioglu M, and Razvi S., 1992, "Strength and Ductility of Confined Concrete" Journal of Structural Engineering, ASCE, 21(3), pp. 468-477.
- [6] Tanaka, H, 1999, "Effect of Lateral Confining Reinforcement on the Ductile Behavior of Reinforced Concrete Columns", IISEE Lecture Note, pp. 26-87.
- [7] Khaloo, A. R., El-Dash, K. M., and Ahmad, S. H., 1999, "Model for Lightweight Concrete Columns Confined by Either Single Hoops or Interlocking Double Spirals", ACI Structural Journal, No. 96-S96, pp.883-890.
- [8] Khaloo, A. R. and Bozorgzadeh, A., 2001, "Influence of Confining Hoop Flexural Stiffness on Behavior of High-Strength Lightweight Concrete Columns", ACI Structural Journal, Vol.98, No.5, pp. 657-664.
- [9] ACI Committee 318, 2002, "Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-02) and Commentary (318R-02)," American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, 443pp.
- [10] Saatcioglu, Salamat and Razvi, 1995, "Confined Columns under Eccentric Loading" Journal of Structural Engineering, ASCE, 121(11), pp. 1547-1556.



شکل ۴- اثر فاصله آرماتور عرضی بر منحنی بار- تغییر مکان میانه ارتفاع در نمونه‌های مختلف