

بررسی توزیع تنش و مقاومت خمشی بتن سبک سازه‌ای

علی رضا انتظاری

دانشجوی دوره دکتری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

a.entezari@azaruniv.edu

جمشید اسماعیلی

استادیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

چکیده:

در این تحقیق توزیع تنش بتن سبک (LWAC) بررسی شده است. تحقیقات زیادی روی رفتار سازه‌ای LWAC انجام شده است، اما هنوز مشخصات آن به خوبی مشخصات بتن معمولی (NWC) شناخته نشده است. مقررات زیادی در آیین‌نامه‌های مختلف به صورت روابط و توصیه‌نامه برای طراحی سازه‌های بتن آرمه که برای NWC کاربرد دارد ارائه شده است. به علت نقش متفاوت سنگ‌دانه‌ها در LWAC و NWC، لازم است رفتار سازه‌ای LWAC بیش‌تر ارزیابی شود. رفتار تنش - کرنش بتن یکی از مشخصاتی است که به عنوان پارامترهای طراحی به کار گرفته می‌شود. در این تحقیق منحنی تنش - کرنش محصور نشده LWAC ساخته شده با اسکوریا و پومیس مورد مطالعه قرار گرفت. در کل ۲۷ مخلوط بتن LWAC ساخته شده با اسکوریا و پومیس آزمایش شده و روابط تنش - کرنش آنها مطالعه گردید. نتایج آزمایش نشان می‌دهد که بلوک تنش مستطیلی مورد نیاز برای طراحی سازه‌های LWAC نیاز به توجه بیش‌تری دارد. ظرفیت خمشی تخمینی با روابط موجود در آیین‌نامه‌ها در مقایسه با ظرفیت خمشی تجربی برای LWAC بزرگتر است که شرایط غیرایمینی برای سازه ایجاد می‌کند. در این مطالعه، معادلات جدید براساس رفتار تنش - کرنش LWAC ارائه شده است که می‌تواند به پیش‌بینی مطمئن‌تر مقاومت خمشی نهایی منجر شود.

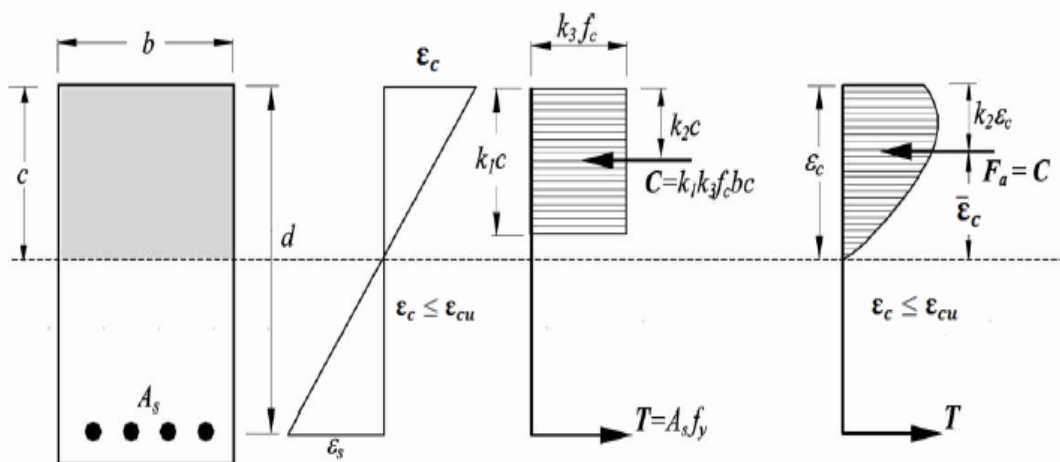
واژه‌های کلیدی: اسکوریا، بتن سبک، پارامتر بلوک تنش، پومیس، منحنی تنش - کرنش.

۱- مقدمه

باشد. با نوشتن معادلات تعادل سه پارامتر، K_1 ، K_2 و K_3 تعریف می‌شود. پارامتر K_3 نسبت حداکثر تنش فشاری (σ_{max}) عضو خمشی به مقاومت فشاری نمونه استوانه‌ای (f'_c) است. پارامتر K_1 نیروی برآیند تنش فشاری در بتن را تعیین می‌کند و پارامتر K_2 موقعیت نقطه اثر برآیند تنش فشاری در بتن را مشخص می‌کند. مقادیر پارامترهای بلوک تنش که با لنگر نهایی مقطع مطابقت می‌کند برای کرنش نهایی تعیین می‌شوند. این پارامترها در شکل (۱) نشان داده شده است.

محققان زیادی روی پارامترهای بلوک تنش مستطیلی بتن معمولی و بتن با مقاومت بالا تحقیق کرده‌اند و روابطی را برای آنها تعیین نموده‌اند که در جدول (۱) به تعدادی از آنها اشاره شده است. برای طراحی LWAC سازه‌ای غیر از اطلاعات اولیه نظیر مقاومت فشاری، مقاومت کششی، مدول گسیختگی، مدول الاستیسیته و کرنش به رفتار تنش - کرنش بتن و پارامترهای طراحی نیز نیاز است. در این تحقیق رفتار تنش - کرنش محصور نشده بتن ساخته شده با سنگ‌دانه اسکوریا (معدن آجواج) و پومیس (معدن اسکندان) که از منطقه آذربایجان - ایران تهیه شده بودند بررسی شد و در ادامه پارامترهای طراحی که از ابزارهای اولیه محاسبات سازه‌های بتنی می‌باشد تعیین گردید.

اندازه‌گیری و مدل‌سازی مناسب توزیع تنش ناحیه فشاری اعضای خمشی بتنی پیچیده و مشکل است. با نادیده گرفتن تنش کششی که توسط بتن تحمل می‌شود، شکل (۱) توزیع تنش و کرنش مقطع تیر بتن آرمه را موقعی که تغییر شکل نسبی بتن فشاری به کرنش نهایی (ϵ_{cu}) رسیده نشان می‌دهد. Koenen اولین پیشنهاد دهنده تئوری ظرفیت گسیختگی نهایی عضوهای خمشی بود. او فرض کرد که توزیع تنش در مقطع عرضی تیر بتن آرمه خطی است و در پهنای سطح مقطع یکنواخت است. نظریه توزیع تنش مستطیلی ابتدا به وسیله Emperge پیشنهاد شد و توسط Whitney برای به کارگیری طراحی مقاومت نهایی (USD) اصلاح گردید [۱]. توزیع تنش فشاری واقعی در مقطع بتن آرمه در تمام مراحل بارگذاری از روی منحنی تنش - کرنش تک محوری فشاری تعیین می‌گردد. در لحظه گسیختگی نهایی مقطع تمام منحنی تنش - کرنش فشاری تک محوری بتن و در مراحل قبل از گسیختگی قسمتی از منحنی فوق استفاده می‌شود. برای پیش‌بینی منحنی تنش - کرنش بتن محصور نشده روابط متعددی توسط محققان ارائه شده است [۲-۷]. این منحنی با توجه به نوع بتن به صورت معادلات ریاضی تعریف می‌شوند. برای طراحی اعضای بتنی باید برآیند تنش فشاری و نقطه اثر آن معلوم



شکل ۱- توزیع تنش واقعی، بلوک تنش مستطیلی و توزیع خطی کرنش مقطع بتن آرمه

جدول ۱- پارامترهای بلوک تنش مستطیلی ارائه شده توسط آیین نامه ها و محققان مختلف برای بتن معمولی و بتن با مقاومت زیاد

ϵ_{cu}	k_3	k_1	مرجع
0.003	0.85	$f'_c \leq 30 \text{ Mpa} : 0.85$ $f'_c > 30 \text{ Mpa} : 1.09 - 0.008f'_c \geq 0.65$	ACI 310-2005[V]
0.003	$f'_c \leq 55 \text{ Mpa} : 0.85$ $f'_c > 55 \text{ Mpa} : 1.07 - 0.004f'_c \geq 0.75$	$f'_c \leq 30 \text{ Mpa} : 0.85$ $f'_c > 30 \text{ Mpa} : 1.09 - 0.008f'_c \geq 0.65$	NZS 3101(1995)[A]
$0.004 - 0.002 \frac{f'_c}{100}$	$0.85(1 - \frac{f'_c}{250})$	1.0	CEB-FIB (1990)[۱]
0.0035	$0.85 - 0.0015f'_c \geq 0.67$	$0.97 - 0.0025f'_c \geq 0.67$	CSA -94 [۱۰]
0.003	0.85	$f'_c \leq 30 \text{ Mpa} : 0.85$ $f'_c > 30 \text{ Mpa} : 1.09 - 0.008f'_c$	Mattock et al.(1961)[۱۱]
0.003	$f'_c \leq 70 \text{ Mpa} : 0.85$ $f'_c > 70 \text{ Mpa} : 1.35 - 0.00725f'_c \geq 0.60$	$f'_c \leq 30 \text{ Mpa} : 0.85$ $f'_c > 30 \text{ Mpa} : 1.09 - 0.008f'_c \geq 0.65$	Azizinamini (1994) [۱۲]
0.003	$0.85(1 - \frac{f'_c}{800}) \geq 0.725$	$0.95(1 - \frac{f'_c}{400}) \geq 0.70$	Ibrahim & MacGregor (1997) [۱۳]
0.003	$57 < f'_c < 100 \text{ Mpa} : 0.99 - 0.0025f'_c$	$57 < f'_c < 100 \text{ Mpa} : 0.70 - 0.00125f'_c$	Pendyala & Mendis (1998) [۱۴]
0.003	$f'_c \leq 55 \text{ Mpa} : 0.85$ $f'_c > 55 \text{ Mpa} : 1.07 - 0.004f'_c \geq 0.75$	$f'_c \leq 30 \text{ Mpa} : 0.85$ $f'_c > 30 \text{ Mpa} : 1.09 - 0.008f'_c \geq 0.65$	Rangan (1999) [۱۵]
$f'_c \leq 55 \text{ Mpa} : 0.003$ $f'_c > 55 \text{ Mpa} : 0.0025$	$f'_c \leq 70 \text{ Mpa} : 0.85$ $f'_c > 70 \text{ Mpa} : 1.13 - 0.004f'_c \geq 0.67$	$f'_c \leq 30 \text{ Mpa} : 0.85$ $f'_c > 30 \text{ Mpa} : 1.09 - 0.008f'_c \geq 0.67$	Bae & Bayrak (2003) [۱۶]
$f'_c \leq 28 \text{ Mpa} : 0.003$ $f'_c > 28 \text{ Mpa} : \frac{0.228}{48 + f'_c} \geq 0.0022$	0.85	$f'_c \leq 20 \text{ Mpa} : 0.85$ $f'_c > 20 \text{ Mpa} : \frac{193}{207 + f'_c} \geq 0.70$	Sun et al. (2003) [۱۷]
$60 \leq f'_c \leq 94 \text{ Mpa} : [2.2 + 0.015(f'_c - 40)]10^{-3}$	$0.964 - 0.002f'_c$	$0.805 - 0.0012f'_c$	Oztekcin et al. (2003) [۱۸]
0.003	$f'_c \leq 30 \text{ Mpa} : 0.85$ $f'_c > 30 \text{ Mpa} : 0.892 - 0.0014f'_c \geq 0.72$	$f'_c \leq 30 \text{ Mpa} : 0.85$ $f'_c > 30 \text{ Mpa} : 0.91 - 0.002f'_c \geq 0.67$	Ozbakkaloglu & Saatcioglu (2003) [۱۹]
0.003	$f'_c \leq 100 \text{ Mpa} : 0.90 - 0.002f'_c$ $f'_c > 100 \text{ Mpa} : 0.7$	$f'_c \leq 100 \text{ Mpa} : 0.90 - 0.002f'_c$ $f'_c > 100 \text{ Mpa} : 0.7$	Tan & Nguyen (2005) [۲۰]

۲- مواد و روش‌ها

۱-۲- مواد مصرفی

در این آزمایش برای اطمینان از صاف بودن سطوح نمونه‌ها برای انتقال بار یکنواخت، ابتدا و انتهای استوانه‌ها طبق توصیه‌های ASTM C 617 با یک مادهٔ گوگردی کلاهیک گذاری شدند. برای کسب منحنی‌های تنش - کرنش محصور نشده، نمونه‌ها در دستگاه هیدرولیکی ELE-ADR ۲۰۰۰ با ظرفیت ۲۰۰۰ kN که چهار LVDT روی آن نصب شده بود آزمایش شدند. ابتدا و انتهای همهٔ نمونه‌ها با مادهٔ گوگردی کلاهیک گذاری شدند. طبق استاندارد ASTM C ۳۹ همهٔ نمونه‌ها با آهنگ Mpa/sec ۰/۳۲ (۵/۳ kN/sec) بار گذاری شدند. تغییر شکل با چهار LVDT موازی با نمونه که روی صفحات فلزی بار گذاری سوار شده بود اندازه‌گیری شد (شکل ۳). مقادیر کرنش اندازه‌گیری شده کرنش‌های اسمی برای کل طول نمونه هستند. میانگین چهار LVDT نصب شده برای محاسبهٔ کرنش واقعی استفاده شد.

۲-۳- روش تحلیل

کاربرد بلوک مستطیلی به جای تنش واقعی تنها یک عامل ریاضی برای برآورد اثر توزیع تنش واقعی بتن است و مفهوم توزیع تنش مستطیلی را ندارد. جزییات بلوک مستطیلی با سه پارامتر K_1 ، K_2 و K_3 مشخص می‌شود. سه پارامتر بلوک تنش را می‌توان با وارد کردن برآیند نیروی فشاری در وسط ارتفاع بلوک تنش مستطیلی به دو پارامتر بلوک تنش مستطیلی معادل کاهش داد.

پارامتر k_2 موقعیت مرکز سطح زیر منحنی تنش - کرنش محصور نشده را نشان می‌دهد که با توجه به شکل (۱) از رابطهٔ زیر تعیین می‌شود:

$$\varepsilon_c = k_2 \varepsilon_c + \bar{\varepsilon}_c \quad (1)$$

$$k_2 = (\varepsilon_c - \bar{\varepsilon}_c) / \varepsilon_c \quad (2)$$

که در آن $\bar{\varepsilon}_c$ مرکز هندسی منحنی تنش - کرنش است که از رابطهٔ زیر محاسبه می‌شود:

$$\bar{\varepsilon}_c = \int_0^{\varepsilon_c^{cu}} f_c \varepsilon_c d\varepsilon_c / \int_0^{\varepsilon_c^{cu}} f_c d\varepsilon_c \quad (3)$$

حال در صورتی که معادلهٔ تنش - کرنش بتن مشخص باشد با جای گذاری در معادلهٔ (۳) می‌توان مرکز سطح منحنی را مشخص

سیمان استفاده شده در تهیهٔ کلیهٔ نمونه‌ها، سیمان پرتلند نوع II (PC) با چگالی ۳/۱۵ و نرمی / $293 \text{ m}^3 \text{ kg}$ بود. در تهیهٔ بتن جهت بهبود ناحیهٔ مرزی LWAC از میکروسلیس (SF) مطابق با ASTM C ۱۲۴۰ با چگالی ویژه ۲/۳۲ و وزن مخصوص توده‌ای 1500 kg/m^3 استفاده شد. با توجه به این که SF خاصیت جذب آب زیاد را دارد و از طرفی سنگ‌دانه‌های سبک اسکوریا و پومیس نیز درصد جذب بالایی را در مقایسه با سنگ‌دانه‌های معمولی دارند در تهیهٔ بتن از فوق‌روان‌کننده استفاده شد. در این تحقیق فوق‌روان‌کنندهٔ معمولی با چگالی ویژه $1/21 \text{ g/cm}^3$ مطابق با آیین‌نامهٔ ASTM C ۴۹۴ به میزان ۱/۵-۰/۸ درصد وزن سیمان به کار گرفته شد. سنگ‌دانهٔ پومیس از معدن طبیعی اسکندان در نزدیکی تبریز (آذربایجان شرقی - ایران) و سنگ‌دانه اسکوریا از معدن طبیعی آجواج در نزدیکی سلماس (آذربایجان غربی - ایران) تهیه شدند.

در این تحقیق اندازه بزرگترین سنگ‌دانه سبک که در تهیهٔ بتن استفاده شد $12/5 \text{ mm}$ بود. مشخصات سنگ‌دانه‌ها در جدول (۲) ارائه شده است.

۲-۲- روش آزمایش‌ها

ارزیابی پارامترهای بلوک تنش مستطیلی روی دو نوع سنگ‌دانه سبک بوده که در ۲۷ مخلوط بتنی آزمایش شده است (جدول ۳). مقاومت فشاری f_c' با آزمایش روی نمونه‌های استوانه‌ای $150 \times 300 \text{ mm}$ با آهنگ بارگذاری $0/32 \text{ Mpa/sec}$ (۵/۳ kN/sec) طبق استاندارد ASTM C ۳۹ تعیین شد و مدول الاستیسیته (E_c) با آزمایش روی نمونه‌های استوانه‌ای $150 \times 300 \text{ mm}$ با آهنگ بارگذاری 255 kpa/sec (۴/۵ مطابق با ASTM C ۴۶۹ اندازه‌گیری شد. اندازه‌گیری مدول الاستیسیته با استفاده از دستگاه هیدرولیکی ELE-۲۰۰۰ ADR انجام شد. نمونه‌ها به یک وسیلهٔ دارای دو سنسور جابجایی (LVDT) با دقت ۰/۳٪ که کرنش ناحیه ۱۵۰ میلی‌متر میانی نمونه‌های استوانه‌ای را اندازه‌گیری می‌کند تجهیز شدند (شکل ۲).

افت سریع داشتند. بنابراین بیان شاخهٔ نزولی منحنی تنش - کرنش خیلی پیچیده و مشکل است. البته برای LWAC با مقاومت بالا این پدیده بیش تر نمایان بود. با توجه به این که بیش ترین کرنش محوری LWAC، تا تنش حداکثر رخ می دهد و اثر ناحیهٔ تنش - کرنش پس از تنش حداکثر در مقابل ناحیه قبل از آن کم تر است در این تحقیق فرض شده است که کرنش نهایی با کرنش متناظر با تنش حداکثر، برابر است (یعنی $\epsilon_{co} = \epsilon_{cu}$) و در تعیین پارامترهای بلوک تنش مستطیلی از این فرض استفاده شده است.

شکل (۴) منحنی تنش - کرنش محصور نشده تعدادی از مخلوط‌های بتن ساخته شده با اسکوریا و پومیس محلی تا نقطهٔ تنش حداکثر را نشان می دهد. منحنی‌های تنش - کرنش با حالت خطی ارتجاعی شروع شده و آنگاه انحناء پیدا کرده وارد محدودهٔ پلاستیک می شود. مشخصات مکانیکی بتن نظیر مدول الاستیسیته استاتیکی و مماس اولیه را می توان از ناحیهٔ خطی منحنی نیز به دست آورد.

اعتقاد بر این است که کاهش سختی LWAC در نتیجهٔ خصوصیات مواد LWA استفاده شده در بتن است و شاخهٔ صعودی تنش - کرنش LWAC تقریباً تا نزدیکی بار حداکثر خطی باقی می ماند. در حالی که در NWC به علت وجود ریز ترک‌های اولیه پاسخ تنش - کرنش در شاخهٔ صعودی به صورت منحنی ظاهر می شود.

برای تعیین سطح و مرکز سطح منحنی تنش - کرنش، بر روی داده‌های آزمایش منحنی تنش - کرنش، برازش رگرسیون غیرخطی انجام گردید. یکی از مناسب ترین معادله ریاضی که با منحنی‌های تنش - کرنش محصور نشده تجربی مطابقت می کرد معادله درجه دو بود (معادله ۷). در برازش غیر خطی معادله درجهٔ دو، ضریب همبستگی برای تمامی منحنی ها بیش از ۰.۹۹٪ حاصل شد.

$$y = a x^2 + b x + c \quad (7)$$

در رابطه (۷) پارامترهای X و Y عبارتند از:

$$y = f_c, \quad x = \epsilon_c \quad (8)$$

با اعمال شرایط مرزی (یعنی $x=0$ و $y=0$) ضریب C برابر صفر خواهد بود. دو ضریب دیگر معادله ۷ با برازش داده‌های

کرد. در این تحقیق برای مشخص کردن نقطهٔ اثر نیروی فشاری (مرکز هندسی منحنی)، منحنی تنش - کرنش به سطوح دوزنقه‌ای با قاعدهٔ ϵ تقسیم شده و نسبت به هر قطعهٔ کوچک رابطهٔ لنگر اول نوشته شد.

با مشاهدهٔ شکل (۱) مشخص می شود پارامتر k_1 دو برابر k_2 است:

$$k_1 = 2 k_2 \quad (4)$$

برای تعیین پارامتر k_3 سطح زیر منحنی تنش - کرنش واقعی برابر با سطح بلوک مستطیلی فرض می شود یعنی:

$$A = k_3 k_1 f_c' \epsilon_{cu} = \int_0^{\epsilon_{cu}} f_c d \epsilon_c \quad (5)$$

پس خواهیم داشت:

$$k_3 = \int_0^{\epsilon_{cu}} f_c d \epsilon_c / k_1 f_c' \epsilon_{cu} \quad (6)$$

۳- نتایج و بحث

۳-۱- منحنی تنش - کرنش

درک چگونگی رفتار مواد تحت اثر اعمال بار، با مطالعهٔ رفتار تنش - کرنش امکان پذیر است. شکل عمومی تنش - کرنش می تواند به سوال مربوط به سختی اولیه و پس از تسلیم، تردی و درجهٔ خسارت مواد در اثر اعمال بار و ظرفیت تغییر شکل کلی مواد را پاسخ دهد.

شیب شاخهٔ نزولی منحنی تنش - کرنش میزان شکل پذیری ماده را تامین می کند. شاخهٔ نزولی با شیب تند خرابی ماده در شرایط تردی را نشان می دهد، در حالی که رفتار تنش - کرنش با شیب تخت کامل یا شاخهٔ افقی پس از تنش حداکثر، یک ماده کاملاً خمیری را نشان می دهد. به دلیل کم بودن سختی سنگ دانه‌های سبک، شاخهٔ نزولی نمونهٔ LWAC تا حدی شیب تندی دارد. در این نوع بتن معمولاً دانه‌های ضعیف تر از خمیر سیمان اطراف خود گرایش به ترک‌های داخلی که مستقیماً درون دانه‌ها تکثیر می شوند دارند. سنگ دانه‌ها در NWC که سخت تر از خمیر سیمان بوده مانع ترک شده طوری که انتشار ترک را به تأخیر انداخته و مادهٔ نرم را به وجود می آورد. نمونه‌های LWAC به ویژه بتن ساخته شده با اسکوریا، موقعی که تحت آزمایش فشاری تک محوری به تنش حداکثر رسیدند به صورت آنی و ترد شکسته شدند. بدین دلیل در آزمایش‌ها بعد از مرحله گسیختگی منحنی‌ها

$$k_1 k_3 = 0.630 - 0.00186 f'_c \quad (11)$$

روابط بالا با منحنی تنش - کرنش محصور نشده تجربی سازگاری بسیار زیادی را دارند. بنابراین، این پارامترها برای استفاده در طراحی اعضای بتنی ساخته شده با LWAC با سنگ‌دانه‌های اسکوریا و پومیس محلی معتبر هستند.

برای ارزیابی روابط پیشنهاد شده ظرفیت خمشی یک مقطع بتن آرمه به ابعاد 200×300 mm دارای دو آرماتور کششی به قطر 16 mm برای بتن‌های با مقاومت‌های فشاری مختلف، با روابط توصیه شده ACI [6] و روابط پیشنهادی در این تحقیق، محاسبه شده و نتایج آن در شکل (5) نشان داده شده است. نتیجه‌ای که می‌توان از شکل (5) گرفت این است که برای یک مقطع مشخص با هر نوع مقاومت فشاری بتن، مقاومت خمشی تیر بتن آرمه LWAC که با روابط پیشنهادی تخمین زده می‌شود کم‌تر از مقادیر تخمینی از روابط توصیه شده ACI برای NWC می‌باشد و این اختلاف با افزایش مقاومت فشاری بتن افزایش می‌یابد.

۳-۳- مقایسه روابط پیشنهادی با روابط موجود

تاکنون روابطی که برای پارامترهای بلوک تنش مستطیلی ارائه شده است برای بتن معمولی و بتن با مقاومت بالا می‌باشند (جدول ۱).

تجربی تنش - کرنش تعیین شدند. در جدول (۴) مقاومت فشاری آزمایش تک محوری، مدول الاستیسیته، کرنش متناظر با تنش حداکثر، وزن مخصوص و ضرایب معادله برازش ارائه شده است.

۳-۲- تعیین پارامترهای بلوک تنش مستطیلی

با جایگزین کردن معادله درجه دوم حاصل از تحلیل رگرسیون غیرخطی تنش - کرنش در روابط (۳) و (۶) پارامترهای بلوک تنش مستطیلی K_1 ، K_2 و K_3 تعیین گردید. روش کار در تعیین این پارامترها شناسایی سطح و مرکز هندسی منحنی تنش - کرنش تا ناحیه تنش حداکثر می‌باشد. تفاوت سطح و مرکز هندسی منحنی تنش - کرنش حاصل از معادله غیرخطی و داده‌های خام به ترتیب ۰/۳۵ و ۰/۳۰ درصد تعیین شد که این اختلاف خیلی جزئی بوده و با اطمینان می‌توان پارامترهای بلوک را از معادلات برازش محاسبه کرد. مقدار پارامترهای بلوک تنش هر طرح اختلاف در جدول (۵) ارائه شده است.

با برازش رگرسیون خطی بین پارامترهای بلوک تنش و مقاومت فشاری مندرج در جدول (۵)، معادلات زیر به دست آمد:

$$k_1 = 0.731 - 0.00076 f'_c \quad (9)$$

$$k_3 = 0.863 - 0.00173 f'_c \quad (10)$$

جدول ۲ - مشخصات سنگ‌دانه‌های مصرفی

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

جدول ۳- مقادیر اجزای تشکیل دهنده مخلوط‌های بتن سبک برای یک مترمکعب بتن (kg/m^3)

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

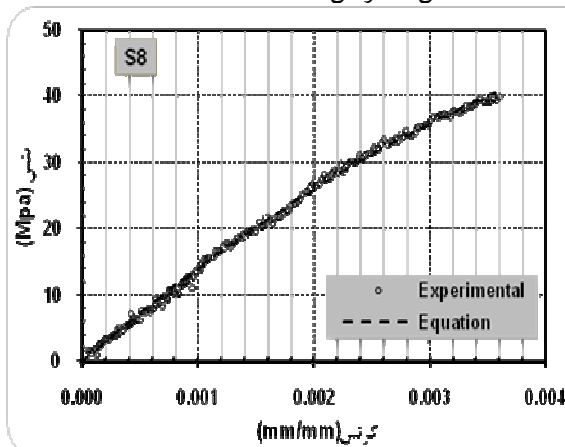
*وزن سنگ‌دانه‌های سبک و معمولی در حالت SSD می‌باشند.



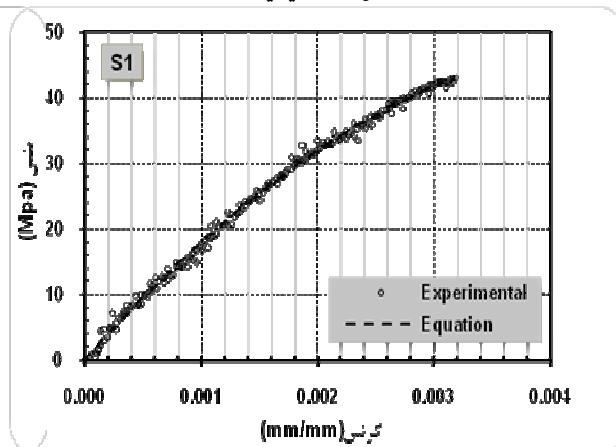
شکل ۳- آزمایش تعیین منحنی تنش - کرنش



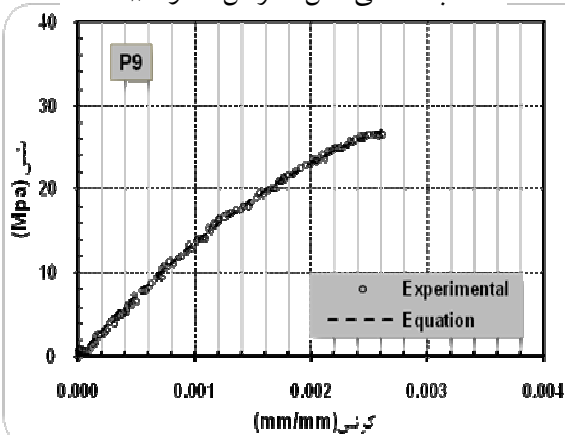
شکل ۲- آزمایش تعیین مدول الاستیسیته



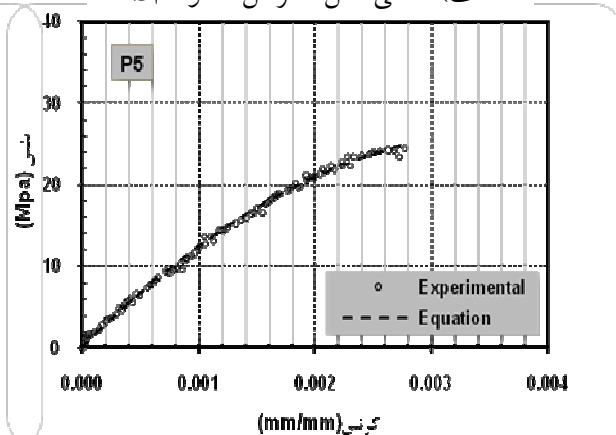
ب) منحنی تنش - کرنش مخلوط S_8



الف) منحنی تنش - کرنش مخلوط S_1



د) منحنی تنش - کرنش مخلوط P_9



ج) منحنی تنش - کرنش مخلوط P_5

شکل ۴- منحنی تنش - کرنش تا تنش حداکثر LWAC ساخته شده با اسکوریا و پومیس

جدول ۴- مشخصات فیزیکی بتن LWAC و ضرایب معادله غیرخطی برازش منحنی تنش - کرنش

شماره طرح اختلاط	مقاومت فشاری (Mpa)	مدول الاستیسیته (Gpa)	کرنش (mm/mm) (وزن مخصوص بتن خشک شده (Kg/m ^۳)	ضریب a	ضریب b
S1	۴۳	۱۵/۹۶۸	۰/۰۰۳۱۸	۱۸۸۴	-۲۰۰۶۶۵۲/۸۰	۱۹۹۵۳/۹۰
S2	۴۴	۱۸/۱۸۶	۰/۰۰۳۴۳	۱۹۴۸	-۲۰۱۵۶۴۵/۲۰	۱۹۵۵۱/۷۳
S3	۴۰	۱۷/۶۶۳	۰/۰۰۲۸۲	۱۹۲۳	-۱۳۳۶۶۹۶/۱۰	۱۷۳۰۸/۱۴
S4	۴۱	۱۴/۰۲۵	۰/۰۰۳۶۰	۱۸۹۸	-۵۶۸۱۱۳/۷۳	۱۳۲۲۳/۹۲
S5	۴۷	۱۸/۷۶۸	۰/۰۰۳۱۱	۱۸۸۷	-۱۲۱۹۴۲۱/۵۰	۱۹۴۵۴/۸۴
S6	۵۱	۱۷/۴۵۶	۰/۰۰۳۷۸	۱۹۰۸	-۸۱۷۲۲۴/۳۹	۱۶۵۱۵/۳۵
S7	۴۷	۱۶/۲۸۲	۰/۰۰۳۶۷	۱۸۹۵	-۱۰۳۳۳۶۲/۰۰	۱۶۸۱۱/۳۳
S8	۴۱	۱۵/۲۰۲	۰/۰۰۳۶۷	۱۷۸۶	-۱۰۴۵۸۱۹/۹۰	۱۵۱۰۱/۷۱
S9	۳۷	۱۳/۰۱۴	۰/۰۰۳۴۱	۱۷۶۲	-۷۶۴۵۳۴/۷۲	۱۳۲۳۳/۳۷
S10	۳۸	۱۴/۸۴۲	۰/۰۰۳۴۵	۱۸۵۶	-۶۲۸۰۳۳/۲۷	۱۳۶۴۴/۴۴
S11	۴۴	۱۴/۱۲۱	۰/۰۰۳۶۱	۱۸۶۸	-۱۰۴۳۳۶۳/۱۰	۱۵۵۶۶/۵۶
S12	۴۲	۱۵/۵۲۴	۰/۰۰۳۴۹	۱۸۱۰	-۱۱۸۲۲۰۲/۲۰	۱۵۹۲۹/۶۵
S13	۳۸	۱۳/۷۴۱	۰/۰۰۳۲۷	۱۸۲۰	-۹۹۹۳۳۵/۴۰	۱۴۸۸۰/۱۹
S14	۳۵	۱۵/۷۴۷	۰/۰۰۲۸۲	۱۷۷۶	-۸۸۷۷۳۹/۵۵	۱۴۹۸۳/۱۰
S15	۳۳	۱۴/۳۳۰	۰/۰۰۲۸۵	۱۷۸۶	-۱۳۲۸۷۶۶/۵۰	۱۵۲۰۱/۲۲
S16	۳۳	۱۴/۶۴۳	۰/۰۰۳۱۸	۱۷۳۸	-۱۶۲۱۸۰۵/۲۰	۱۵۳۹۲/۱۵
S17	۳۷	۱۵/۲۹۵	۰/۰۰۳۳۲	۱۷۲۴	-۱۶۴۴۶۰۷/۲۰	۱۶۴۴۹/۰۱
P1	۲۷	۱۰/۹۲۴	۰/۰۰۲۹۹	۱۷۳۲	-۱۳۲۳۷۴۲/۱۰	۱۳۲۱۳/۹۴
P2	۳۲	۱۴/۸۶۸	۰/۰۰۳۳۱	۱۶۹۰	-۱۹۷۲۹۲۳/۰۰	۱۶۳۳۵/۹۱
P3	۲۵	۱۱/۸۵۹	۰/۰۰۲۷۶	۱۶۷۴	-۱۲۱۰۷۶۳/۰۰	۱۲۴۲۷/۴۵
P4	۲۴	۱۲/۱۱۰	۰/۰۰۳۰۳	۱۶۱۰	-۱۹۵۳۷۷۴/۲۰	۱۴۰۶۰/۵۰
P5	۲۵	۱۱/۰۳۷	۰/۰۰۲۷۷	۱۶۸۰	-۱۹۱۸۶۴۵/۴۰	۱۴۳۲۹/۸۰
P6	۲۷	۱۳/۷۸۷	۰/۰۰۲۵۵	۱۶۹۴	-۱۸۳۲۴۲۶/۹۰	۱۵۵۶۸/۳۱
P7	۲۶	۱۳/۵۶۷	۰/۰۰۲۷۱	۱۵۶۴	-۱۱۷۱۱۹۰/۹۰	۱۲۶۷۰/۵۳
P8	۲۵	۱۱/۱۱۸	۰/۰۰۲۹۱	۱۵۷۸	-۱۰۳۰۴۹۵/۴۰	۱۱۶۶۳/۴۳
P9	۲۷	۱۳/۹۷۲	۰/۰۰۲۶۱	۱۶۴۸	-۱۹۶۵۹۳۲/۹۰	۱۵۴۶۸/۰۷
P10	۲۶	۱۱/۷۲۴	۰/۰۰۲۷۴	۱۶۳۴	-۱۷۴۸۷۱۰/۹۰	۱۴۲۸۱/۷۳

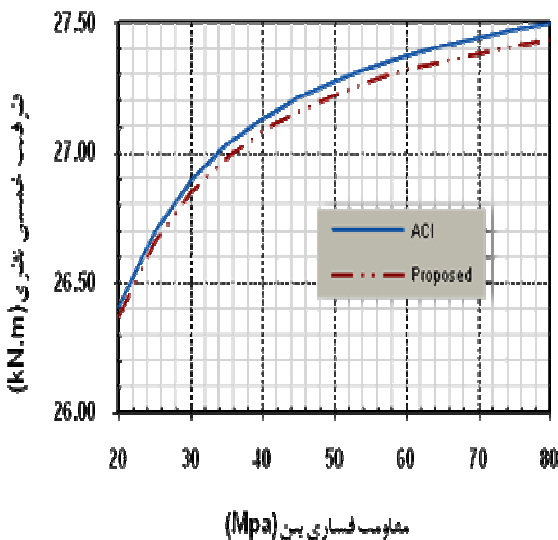
جدول ۵ - پارامترهای بلوک تنش مستطیلی برای هر نمونه

شماره طرح اختلاط	مقاومت فشاری (Mpa)	مخلوط			مقاومت
		K_1	K_2	K_3	
S1	43	0.7118	0.3559	0.8155	
S2	44	0.7181	0.3590	0.8111	
S3	40	0.6950	0.3475	0.7504	
S4	41	0.6858	0.3429	0.7592	
S5	47	0.6916	0.3458	0.8098	
S6	51	0.6904	0.3452	0.7759	
S7	47	0.6962	0.3481	0.8072	
S8	41	0.6999	0.3499	0.7897	
S9	37	0.6919	0.3459	0.7656	
S10	38	0.6864	0.3432	0.8068	
S11	44	0.6987	0.3494	0.7665	
S12	42	0.7015	0.3507	0.7806	
S13	38	0.7030	0.3515	0.7687	
S14	35	0.6876	0.3438	0.7857	
S15	33	0.6999	0.3499	0.7886	
S16	33	0.7146	0.3573	0.8121	
S17	37	0.7140	0.3570	0.8145	
P1	27	0.7083	0.3541	0.8138	
P2	32	0.7272	0.3636	0.8490	
P3	25	0.7031	0.3515	0.8008	
P4	24	0.7316	0.3658	0.8731	
P5	25	0.7214	36.07	0.8411	
P6	27	0.7084	0.3542	0.8302	
P7	26	0.7001	0.3500	0.7857	
P8	25	0.7011	0.3506	0.8022	
P9	27	0.7140	0.3570	0.8281	
P10	26	0.7147	0.3573	0.8087	

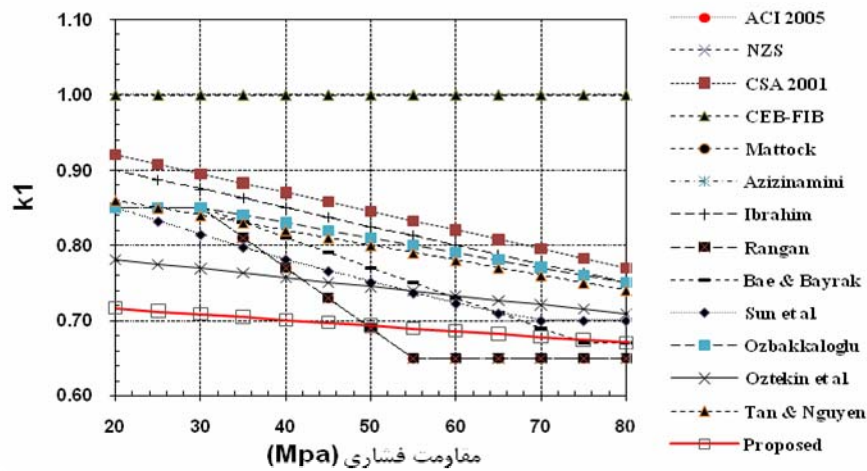
برای این که در یک نگاه روابط به دست آمده با روابط موجود مقایسه شود، تعدادی از روابط پیشنهادی محققان و توصیه‌های آیین‌نامه‌ای به همراه روابط این تحقیق به صورت نمودار در شکل‌های (۶) نشان داده شده است.

پارامتر K_3 به ازای تمامی مقاومت‌های فشاری بتن در مقایسه با ACI [۶] کم‌تر است و با رابطه آیین‌نامه CSA [۱۰] تقریباً هم‌پوشانی دارد. برای LWAC ساخته شده با اسکوریا و پومیس محلی با مقاومت فشاری کم‌تر از ۳۵ Mpa می‌توان از رابطه پیشنهادی Ibrahim و همکاران [۱۳] استفاده کرد. رابطه پیشنهادی CEB-FIB [۹] برای LWAC محافظه‌کارانه و غیراقتصادی می‌باشد. رابطه پیشنهادی برای K_3 توسط ACI و دیگر محققان را نمی‌توان با اطمینان برای LWAC استفاده کرد. لذا لازم است صحت روابط فوق در برآورد مقاومت خمشی مقاطع LWAC با نتایج آزمایشگاهی مورد ارزیابی قرار گیرند.

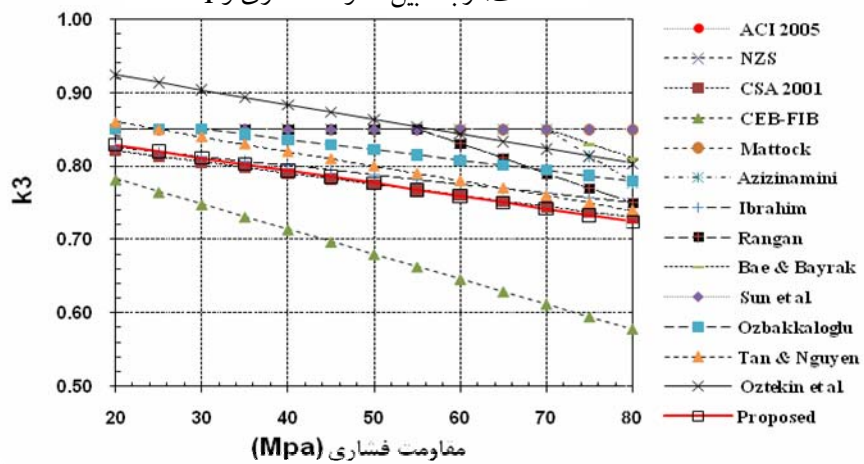
با مشاهده رابطه بین K_1 و K_2 با مقاومت فشاری حاصل از نتایج این تحقیق و روابط پیشنهادی آیین‌نامه‌ها و محققان (شکل ۶) می‌توان نتیجه گرفت که روابط موجود ارائه شده توسط منابع مختلف (جدول ۱) برای بتن‌های LWAC ساخته شده با اسکوریا و پومیس محلی خیلی قابل اعتماد نمی‌باشند.



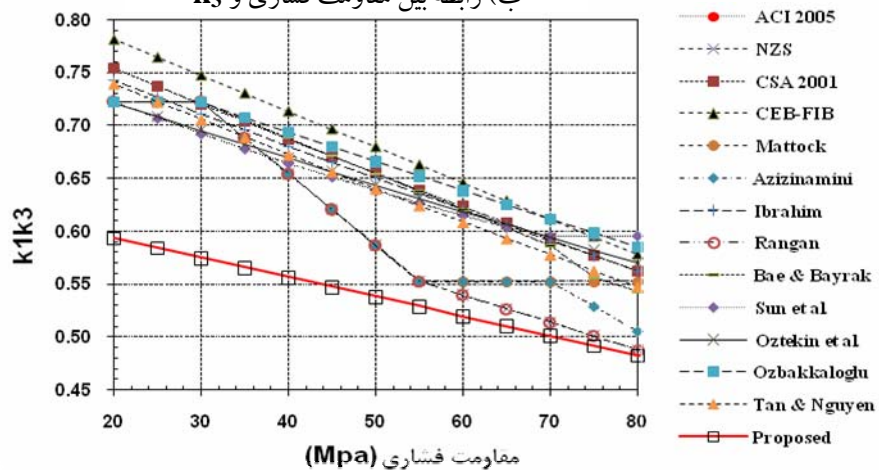
شکل ۵- مقایسه روابط پیشنهادی با ACI برای LWAC



الف) رابطه بین مقاومت فشاری و k_1



ب) رابطه بین مقاومت فشاری و k_3



ج) رابطه بین مقاومت فشاری و $k_1 k_3$
شکل ۶- روابط بین پارامترهای بلوک تنش و مقاومت فشاری

LWAC

Concrete in Compression," American Concrete Ins. J. Proceeding, 75(11), 603-614, 1978.

[4]. Mander, J.B.; Priestley, M. J. N; Park, R. "Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete," ASCE Journal of Structural Engineering, 114(8), 1804-1826, 1988.

[5]. Wee, T. H.; Chin, M. S.; and Mansur, M. A., "Stress-Strain Relationship of High Strength Concrete in Compression," Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE, 1996.

[6]. Attard, M. M.; Setunge, S., "Stress-Strain Relationship of Confined and Unconfined Concrete," ACI Materials Journal, 93(5), 432-442, 1996.

[7]. ACI Committee 318, "Building Code Requirements for Structural Concrete," ACI (318-05) and Commentary (318R-05), American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2005.

[8]. New Zealand Concrete Structures Standards (NZS 3101), New Zealand Standards, 1995.

[9]. CEB-FIB Model Code 1990, Thomas Telford Services Ltd., London, for Comité Euro-International du Béton, Lausanne, 1993.

[10]. CSA Technical Committee, CSA-94, "Design of Concrete Structures for Buildings," CAN3-A23.3-M94, Canadian Standards Association, Rexdale, Ont, Canada, 1994.

[11]. Mattock, A. H.; Kriz, L. B.; Hognestad, E., "Rectangular Concrete Stress Distribution in Ultimate Strength Design," Journal of the American Concrete Institute, 32(8), 875-928, 1961.

[12]. Azizinamini, A.; Kuska, S. S. B.; Brungardt, P.; Hatfield, E., "Seismic Behavior of Square High-Strength Concrete Columns," ACI Structural Journal, 91(3), pp. 336-345, 1994.

[13]. Ibrahim H.; MacGregor J.G., "Modification of ACI Rectangular Stress Block for High-Strength Concrete," ACI Structural Journal; 94(1), pp 40-48, 1997.

[14]. Pendyala, R.; Mendis, P. A., "A Rectangular Stress Block for High Strength Concrete," Structural Engineering Journal, Institution of Engineers, Australia, pp.135-144, 1998.

[15]. Rangan, B. V., "Studies on High-Performance High Strength Concrete (HPHSC) Columns," ACI Special Publication-186, pp. 745-764, May 1999.

[16]. Bae, S.; Bayrak, O., "Stress Block Parameters for High-Strength Concrete Members," ACI Structural Journal, 100(5), pp 626-636, 2003.

[17]. Sun, C.; Girgis, A.; Tadros, M. K.; Badie, S., "Structural Behavior of Flexural Member with High-Strength Concrete," ISHPC, 2003.

[18]. Oztekin, E.; Pul, S.; Husem, M., "Determination of Rectangular Stress Block Parameters for High

۳- نتیجه گیری

در این تحقیق پارامترهای بلوک تنش مستطیلی معادل K_1 ، K_2 و K_3) با به کارگیری قسمتی از منحنی تنش - کرنش محصور نشده LWAC، که به صورت تجربی به دست آمده است، تعیین گردید.

نتایج تجربی که به صورت روابط ریاضی بیان شده است با دیگر روابط موجود مقایسه شد. در زمینه بررسی های تجربی و نظری گزارش شده در این تحقیق، نتایج زیر حاصل شد:

۱- پاسخ فشار تک محوری LWAC با NWC شباهت داشته ولی از نظر کمیت و رفتارشناسی تفاوت دارند.

۲- پارامتر K_3 با تعدادی از روابط موجود که برای بتن معمولی و بتن با مقاومت بالا ارائه شده است تا حدودی مطابقت دارد. اما توصیه بر این است که برای LWAC تهیه شده با اسکوریا و پومیس محلی این پارامتر با رابطه پیشنهاد شده در این مقاله (معادله ۱۰) استفاده گردد.

۳- روابط موجود در تعیین پارامتر K_1 برای این نوع بتن (LWAC) معتبر نمی باشد. بنابراین در بتن هایی که از مصالح سبک دانه طبیعی استفاده می شود روابط (۹) و (۱۱) بهتر جواب می دهد.

۴- روابط پیشنهادی برای اعضای خمشی محصور نشده معتبر است و به علت این که در اعضای خمشی محصور شده مقاومت خمشی بیش تر از غیر محصور می باشد با اطمینان بیش تر می توان از این روابط استفاده کرد.

۵- اثرات K_1 ، K_2 و K_3 محاسبه شده در این تحقیق منجر به کاهش ظرفیت خمشی اسمی محاسبه شده مقطع خمشی نسبت به روابط ارائه شده در نتایج مختلف می گردد، بنابراین توصیه می شود روابط پیشنهاد شده مبنای ارزیابی ظرفیت خمشی قرار گیرد.

منابع

- [1]. Yi, S. T.; Kim, J. H.; Kim, J. K., "Effect of Specimen Sizes on ACI Rectangular Stress Block for Concrete Flexural Members," ACI Structural Journal, 99(5), 701-708, 2002.
- [2]. Hognestad, E.; Hanson, N. W., McHenry, D., "Concrete Stress Distribution in Ultimate Strength Design," ACI Journal, Proceedings; 52(12), 455-79, 1955.
- [3]. Wang, P.T.; Shah, S.P.; Naaman, A. E., "Stress-Strain Curve for Normal and Lightweight

Structural Journal, 101(4), pp. 475-483, 2004.
[20].Tan, T. H. ; Nguyen, N.B., "Flexural Behavior
of Confined High-Strength Concrete Columns,"
ACI Structural Journal,102(2), pp. 198-205, 2005.

Strength Concrete," Engineering Structures, 25(3),
pp. 371-376, 2003.
[19].Ozbakkaloglu,T.; Saatcioglu,M., "Rectangular
Stress Block for High-Strength Concrete," ACI