

بررسی مقاومت برشی منگنه ای (پانچینگ) دالهای بتن سبک ساخته شده از سنگدانه‌های معدنی سبک

محمد رضا اصفهانی^۱؛ حمید سروش^۲

چکیده

در این مقاله مقاومت برشی منگنه ای دالهای بتن سبک ساخته شده از پوکه های معدنی سبک بررسی شده است. در کار آزمایشگاهی، شش نمونه دال مربعی با استفاده از پوکه‌های معدنی سبک ساخته و آزمایش شد. پارامترهای متغیر در این دالها، مقاومت بتن و درصد آرماتور کششی بوده اند. ابعاد و درصد آرماتور دالها طوری انتخاب شده اند که انهدام به صورت برش منگنه ای باشد. در آزمایش ها، مقدار مقاومت برشی منگنه ای و تغییر مکان نهایی برای هر یک از آنها اندازه گیری شده است. با توجه به داده‌های بدست آمده، در مورد شکل انهدام و نوع ترکها، روابط بار-تغییر مکان و سختی هر یک از نمونه‌ها بحث شده و در پایان نتایج آزمایش ها با روابط آیین‌نامه‌های مختلف مقایسه و میزان دقت هر یک از آیین‌نامه‌ها در ارتباط با نحوه تاثیر پارامترهای مختلف بر مقاومت برشی منگنه ای دالهای بتن سبک تعیین شده است. این مقایسه ها نشان می‌دهد که آیین‌نامه BS-8110 در محاسبه مقاومت برشی منگنه ای دالهای بتن سبک، همچون دالهای معمولی، نسبت به آیین‌نامه های دیگر از دقت بیشتری برخوردار می باشد. نتایج آزمایش ها نشان می دهند که دالهای بتنی ساخته شده از پوکه‌های معدنی سبک در صورت طرح اختلاط و عمل‌آوری مناسب می‌تواند در سازه‌ها مورد استفاده قرار گیرد.

کلمات کلیدی

بتن سبک، برش منگنه ای، دال، سنگدانه های معدنی.

Punching Shear strength of Lightweight Concrete Slabs using Natural Lightweight Aggregates

M. Reza Esfahani; H. Soroush

ABSTRACT

In this papers, the punching shear strength of flat plate lightweight concrete slabs, using natural lightweight aggregates, is studied. In the experimental part of the study, six specimens of rectangular lightweight concrete slabs have been manufactured and tested. The strength of concrete and reinforcement varied in different tests. The slab dimensions and the area of reinforcing bars in slabs have been carefully designed so that the slabs failed due to punching shear. In each test, load and displacement were measured using a computer data acquisition system.

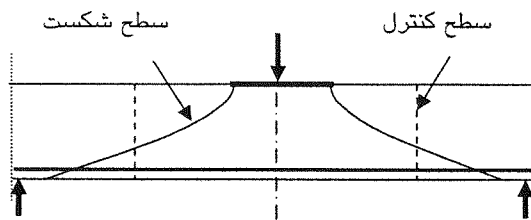
The behavior of slabs, cracking pattern and the slab stiffness were studied from the test results. The experimental results have been compared with the provisions of different codes. The comparison shows that the BS-8110 Code estimates the punching shear of lightweight slabs most accurately. The slabs made of natural lightweight aggregates can be used in structures by providing good concrete mixture designs.

KEYWORDS

Natural Lightweight Aggregate, Lightweight Concrete, Slab, Punching shear

^۱ دانشیار، دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده مهندسی، گروه عمران esfahani@ferdowsi.um.ac.ir

^۲ کارشناس ارشد، دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده مهندسی.



شکل (۱): شکل واقعی و محیط کنترل فرضی در برش منگنه ای

ایمنی در برابر شکست منگنه ای از مقایسه تنش برشی وارده با پارامتر مقاومت برشی بتن (τ_c) که اغلب بوسیله مقاومت کششی بتن تعریف می‌شود، بدست می‌آید. روش سطح کنترل به عنوان روشی عملی و ساده معرفی شده که در صورت کاربردی مناسب، برای پیش بینی مقاومت، واقع گرایانه و مناسب خواهد بود. این روش توسط تعداد زیادی از آیین نامه های ساختمانی پذیرفته شده است.

پس از محاسبه تنش برشی اسمی در سطح محیط کنترل، این تنش با تنش برشی مجاز که توسط آیین نامه معرفی شده، مقایسه می‌گردد. اگر مقدار تنش برشی اسمی کمتر از تنش برشی مجاز باشد دال از نظر برش پانچینگ مشکل نخواهد داشت. در غیر اینصورت باید با تمهیداتی از قبیل افزایش بعد ستون، استفاده از سرستون و یا آرماتور برشی دال با این نوع شکست برشی مقابله کرد. کمیت هایی مانند: مقاومت فشاری بتن، درصد آرماتورهای طولی و عرضی (خمشی و برشی)، ابعاد ستون، فاصله محیط کنترل از لبه ستون، ابعاد دال و خروج از مرکزیت بار اعمالی می‌توانند در مقاومت برشی منگنه ای مورد توجه قرار گیرند.

از آنجا که روابط به دست آمده از این روش صرفاً از طریق تجربی تعیین شده، برای به دست آمدن آنها نیاز به فرضهای اولیه ای می‌باشد. به عنوان مثال می‌توان شکل محیط کنترل و فاصله آن از لبه ستون را فرض کرد و بر اساس آن تاثیر سایر کمیت ها را مشخص نمود.

۳- روابط آیین نامه های ساختمانی

روابط آیین نامه ها از نظر مشخص کردن محیط کنترل، محاسبه تنش برشی اسمی و انتخاب پارامتر مقاومت برشی بتن با هم تفاوت دارند. بر اساس ضوابط آیین نامه های مختلف می‌توان رابطه کلی زیر را برای محاسبه مقاومت برش منگنه ای در بارگذاری مربعی بکار برد:

$$P = 4(B + 2\beta t) t \tau_c \quad (1)$$

که در آن P مقاومت برشی پیش‌بینی شده، B بعد بار گذاری، t

تحمل بارهای وارده از جمله اهداف ساخت یک سازه است. هر چقدر بارهای وارده کوچکتر باشند اعضای سازه مورد نظر ظریفتر خواهند شد که این موضوع هم از لحاظ اقتصادی و هم از نظر ایجاد فضای بیشتر، مهم و قابل توجه است. در راستای کاهش بارهای وارده بر سازه ها پیشرفت های چشمگیری حاصل شده است که یکی از آن موارد استفاده از بتن سبک در سازه های بتن آرمه می باشد. بتن سبک در دالها بعنوان مصالحی که بیشترین بار مرده وارد بر سازه ناشی از وزن آن بوده، بسیار حائز اهمیت است. با استفاده از بتن سبک در دالها، وزن کل سازه کاهش یافته، نیروی زلزله وارد بر سازه کمتر شده و در نتیجه مقاطع کوچکتر و فولاد کمتری برای تحمل بارها مورد نیاز است. به همین دلیل، استفاده از بتن سبک به سرعت در حال پیشرفت و توسعه است بطوری که در دهه گذشته، پل ها و سکوها استخراج نفت زیادی با استفاده از بتن سبک در بسیاری از کشورهای اروپایی نظیر نروژ، سوئد و آلمان ساخته شده و مورد بهره برداری قرار گرفته است [۱]، [۲].

مشکلی که در استفاده از دالهای بتن سبک وجود دارد این است که روابط طراحی آیین نامه ها عموماً بر مبنای آزمایش هایی است که بر روی نمونه های بتن معمولی انجام شده و در زمینه استفاده از بتن سبک اطلاعات کمی وجود دارد.

با توجه به داده های کمی که در مورد عملکرد دالهای بتن سبک وجود دارد، انجام تحقیقاتی که منجر به روشن تر شدن رفتار دالهای بتن سبک شود ضروری بنظر می رسد. از این رو در این تحقیق با ساخت دالهای بتن سبک با استفاده از پوکه معدنی سبک، رفتار برش منگنه ای این دالها ارزیابی قرار گرفته و نتایج آزمایش با آیین نامه ها مقایسه شده است. در ادامه با استفاده از روش سطح کنترل که مبنای محاسباتی مقاومت برشی منگنه ای در بسیاری از آیین نامه ها است، مقاومت برشی منگنه ای محاسبه شده و سپس یک کار آزمایشگاهی در مورد دال سبک بتنی ارائه می گردد.

۲- روش سطح کنترل

در این روش تنش برشی اسمی از تقسیم مقاومت برشی منگنه ای بر سطح محیط کنترل، در اطراف ناحیه بارگذاری، مشخص می‌شود شکل (۱). سطح محیط کنترل بر سطح دال عمود است و محیط آن در فاصله مشخص شده خاصی از ناحیه بارگذاری تعیین می‌شود. عمق سطح ممکن است عمق کل دال H ، عمق مؤثر دال، d و یا بازوی مقاوم لنگر داخلی z باشد.

که در آن $t=d$ ، $\tau_c = 0.332 f_c'^{\frac{1}{2}}$ و $\beta=0.5$ است. محیط کنترل در فاصله $0.5d$ است ولی می تواند به صورت کثیر الاضلاع باشد. برای بارگذاری دایره ای با قطر B ، ضریب $4(B+d)$ با ضریب $\pi(B+d)$ جایگزین می شود. در حالت آرماتورگذاری دو طرفه d ، میانگین حسابی عمق مؤثر در دو جهت خواهد بود [5].

۳-۴- آیین نامه ساختمان انگلستان BS-8110

مقاومت برش منگنه ای برای بار گذاری مربعی از رابطه زیر به دست می آید:

$$P = 4(B + 3d)d \times 0.29 \left(\frac{0.2}{d}\right)^{\frac{1}{4}} (100\rho f_c')^{\frac{1}{3}} \quad (5)$$

این معادله نیز مشابه معادله (۱) است، بطوریکه: $t=d$ ،

$$\tau_c = 0.29 \left(\frac{0.2}{d}\right)^{\frac{1}{4}} (100\rho f_c')^{\frac{1}{3}} \quad \text{و} \quad \beta=1.5 \quad \text{است.}$$

محیط کنترل اغلب مستطیلی و با حداقل فاصله $1.5d$ از محیط بار گذاری شده قرار دارد. در مورد بارگذاری دایره ای دقیقاً مشابه بارگذاری مربعی عمل می شود. عمق مؤثر و نسبت آرماتور در شبکه بندیهای مربعی به صورت میانگین حسابی محاسبه می شود. حد بالای مؤثر برای نسبت آرماتور $\rho=0.03$ فرض شده است [6].

۳-۵- آیین نامه بتن دانمارک DS-411

مقاومت برشی منگنه ای در آیین نامه بتن دانمارک به شکل زیر ارائه شده است:

$$P = 4(B + 2d)H(0.1f_c')^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

که در آن $t=H$ ، $\tau_c = 0.316(f_c')^{\frac{1}{2}}$ و $\beta=d/H$ است.

برای بارهای چند ضلعی محیط کنترل به شکل همان چند ضلعی و با فاصله d از محل بار گذاری شده، می باشد. اگر بارگذاری دایره ای با قطر B باشد، ضریب $4(B+2d)$ با $\pi(B+2d)$ جایگزین می شود [7].

۳-۶- آیین نامه بتن کانادا (CSA) و ایران (آبا)

آیین نامه های بتن کانادا [۸] و ایران [۹] فرمول واحدی را برای بررسی مقاومت دال در برابر برش منگنه ای ارائه داده اند. فرمول ذکر شده در این دو آیین نامه از لحاظ کمیت های مؤثر و از لحاظ شکل فرمولی کاملاً مشابه آیین نامه ACI بوده ولی بار مجاز در آیین نامه های کانادا و ایران $1/2$ برابر آیین نامه بتن آمریکا می باشد.

ضخامت دال (H یا d)، ضریب ثابت و پارامتر مقاومت برشی بتن است.

در ادامه روابط آیین نامه های اروپا، آمریکا، انگلستان، دانمارک، کانادا، ایران در محاسبه مقاومت منگنه ای برای مقایسه با یکدیگر ارائه می شوند. در کلیه روابط نیرو بر حسب مگا نیوتن، بعد ستون و ضخامت دال بر حسب متر، f_c' و τ_c مقاومت فشاری نمونه استوانه ای استاندارد و پارامتر مقاومت برشی بتن بر حسب مگاپاسکال و ρ نسبت سطح مقطع آرماتور طولی در واحد طول به ضخامت مؤثر دال است.

۳-۱- مدل آیین نامه اروپا CEB-FIP(MC-90)

در آیین نامه اروپا مقاومت در برابر برش منگنه ای برای بار گذاری مربعی به شکل زیر است:

$$P = 4(B + 4d)d \times 0.18 \left[1 + \left(\frac{0.2}{d}\right)^2\right]^{\frac{1}{2}} (100\rho f_c')^{\frac{1}{3}} \quad (7)$$

این معادله شبیه به معادله (۱) است که در آن: $t=d$ ،

$$\tau_c = 0.18 \left[1 + \left(\frac{0.2}{d}\right)^2\right]^{\frac{1}{2}} (100\rho f_c')^{\frac{1}{3}} \quad \text{و} \quad \beta=2 \quad \text{است.}$$

برای بارگذاری دایره ای با قطر B ، ضریب $4(B+4d)$ با $\pi(B+4d)$ جایگزین می شود. اگر دال در دو جهت مسلح شده باشد، d میانگین عمق مؤثر در دو جهت و ρ میانگین حسابی نسبت آرماتورهای طولی خواهد بود [3].

۳-۲- مدل آیین نامه اروپا Eurocode2 (EC-2)

این آیین نامه مقاومت برشی منگنه ای در بار گذاری مربعی را به صورت زیر بیان می کند:

$$P = 4(B + 3d)d \times 0.035(1.6 - d)(1.2 + 40\rho)f_c'^{\frac{2}{3}} \quad (8)$$

که با مقایسه با رابطه (۱) داریم: $t=d$ ،

$$\tau_c = 0.035(1.6 - d)(1.2 + 40\rho)f_c'^{\frac{2}{3}} \quad \text{و} \quad \beta=1.5$$

در بار دایره ای با قطر B ، ضریب $4(B+3d)$ با ضریب $\pi(B+3d)$ جایگزین می شود. حداکثر عمق مؤثر $0/6$ متر و حد بالای مؤثر نسبت آرماتور برابر با $0/15$ است [4].

۳-۳- آیین نامه بتن آمریکا ACI 318 - 2000

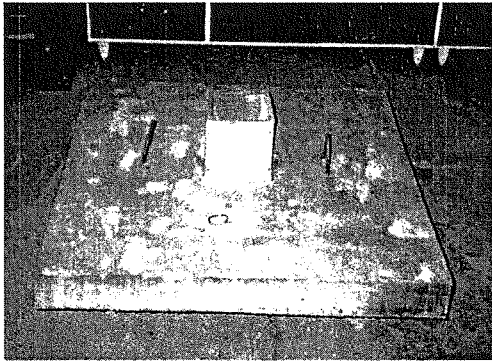
در آیین نامه ACI مقاومت برش منگنه ای برای بار مربعی بصورت زیر محاسبه می شود:

$$P = 4(B + d)d \times 0.332 f_c'^{\frac{1}{2}} \quad (9)$$

۴- ساخت دالهای بتن سبک و نتایج آزمایشگاهی

۴-۱- معرفی نمونه ها

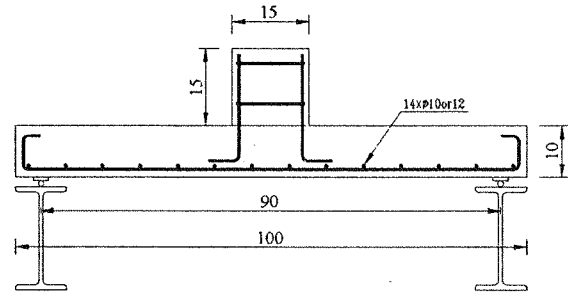
در این تحقیق ۶ دال با استفاده از پوکه های سبک معدنی فاروج ساخته و مورد آزمایش و شکست قرار گرفته است. دالها مربعی شکل به بعد ۱۰۰ و ضخامت ۱۰ سانتیمتر هستند که در وسط یک ستون مربعی به بعد و ارتفاع ۱۵ سانتیمتر دارند. شکل (۲) جزئیات دالهای ساخته شده و شکل (۳) یک دال ساخته شده پس از باز کردن قالب ها را نشان می دهند.



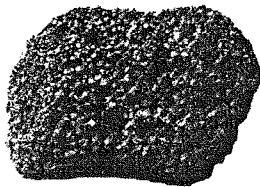
شکل (۳): یک دال ساخته شده پس از باز کردن قالب ها

جدول (۱): مشخصات دالهای ساخته شده

شماره نمونه	f'_c MPa	ρ %	قطر آرماتور mm	وزن مخصوص kg/m^3
S1	۲۲/۱	۱/۱	۱۰	۱۹۱۰
S2	۲۲/۵	۱/۵۸	۱۲	۱۹۰۰
S3	۲۲/۴	۱/۱	۱۰	۱۹۶۰
S4	۲۱/۷	۱/۵۸	۱۲	۱۹۶۰
S5	۴۰/۵	۱/۱	۱۰	۱۹۸۰
S6	۴۱/۲	۱/۵۸	۱۲	۱۹۸۰



شکل (۲): جزئیات دالهای ساخته شده



شکل (۴): شکل ظاهری پوکه معدنی فاروج

جدول (۲): ترکیبات شیمیایی پوکه معدنی فاروج

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

پارامترهای متغیر در این دالها مقاومت بتن مصرفی و درصد آرماتور کششی استفاده شده در آنها است. درصد آرماتور کششی دالها طوری انتخاب شده است که انهدام آنها تحت بار ثقلی به صورت برش منگنه ای باشند و انهدام خمشی در آنها اتفاق نیفتد. از این رو نسبت آرماتور مورد استفاده در دالها ۱/۱٪ و ۱/۵۸٪ تعیین شدند. مقاومت بتن مورد استفاده نیز در سه رده تقسیم بندی شده است که بطور متوسط می توان گفت که مقاومت های بدست آمده از بتن دالها ۲۲/۸، ۳۲، ۴۰/۹ مگاپاسکال است. مشخصات و وزن مخصوص هر یک از دالهای ساخته شده در جدول (۱) ارائه شده است.

۴-۲- پوکه معدنی سبک فاروج

برای تولید بتن سبک از بین سنگدانه های سبک موجود در کشور، مناسبترین سنگدانه پوکه معدنی معادن فاروج تشخیص داده شد. شایان ذکر است که جنس این سنگدانه از نوع آتشفشانی می باشد. ترکیبات شیمیایی این سنگدانه در جدول (۲) و شکل ظاهری آن در شکل (۴) نشان داده شده است.

۴-۳- دانه بندی پوکه ها

پس از خرد کردن پوکه ها باید آنها را برای استفاده در بتن دانه بندی کرد. بدین منظور پوکه ها در سه اندازه به شرح زیر تقسیم می شوند:

۱- ریز دانه، دانه های با ابعاد کوچکتر از ۴/۸ میلیمتر

۲- درشت دانه که دو نوع هستند:

-دانه های نخودی با ابعاد بین ۴/۸ تا ۱۰ میلیمتر

-دانه های بادامی با ابعاد بین ۱۰ تا ۱۹ میلیمتر

با توجه به توصیه آیین نامه ۳۲۰ ASTM، مصالح سنگی درشت دانه بصورت ترکیبی از ۳۰٪ وزنی دانه های بادامی و ۷۰٪ وزنی دانه نخودی در نظر گرفته می شود، سپس با تغییر نسبت ریز دانه به درشت دانه، دانه بندی های مختلف برای رسیدن به مقاومت های متفاوت بدست خواهد آمد.

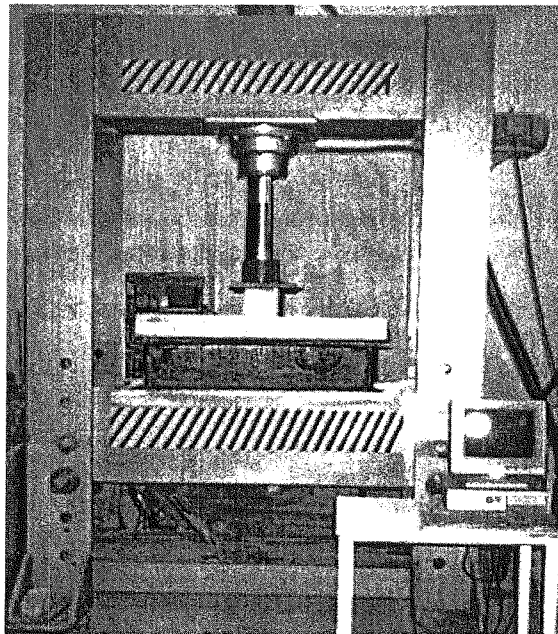
۵- آزمایش نمونه ها

پس از گذشت ۲۸ روز از بتن ریزی، نمونه ها توسط یک جک هیدرولیکی مورد آزمایش قرار گرفت. به منظور ایجاد تکیه گاه ساده برای دال از یک قاب فولادی که با استفاده از پروفیل IPE20 ساخته شده است، استفاده شد. روی این قاب میلگرد قرار داده شده و سپس برای آنکه از تنش های موضعی در دال جلوگیری شود، چهار عدد تسمه فولادی جهت روی آرماتورها قرار داده شده است.

پس از قرار گرفتن نمونه ها در محل مخصوص، بارگذاری آنها آغاز شد. برای بارگذاری نمونه ها از یک جک هیدرولیکی استفاده شد. جک هیدرولیکی مجهز به یک رایانه است که نیروی وارده به نمونه را به صورت دیجیتال نشان می دهد. سرعت بارگذاری دستگاه بوسیله شیر که دبی روغن را کنترل می کند انجام می پذیرد. نحوه قرارگیری نمونه روی دستگاه آزمایش در شکل (۵) مشخص شده است.

پس از تنظیم دستگاه، شیر مخصوص، بارگذاری به آرامی شروع و همزمان با آن تغییر مکان وسط دال، تغییر مکان سنجی که در پایین دال نصب شده اندازه گیری شد. سرعت

بارگذاری برای هر نمونه حدود $50 \frac{kg}{Sec}$ بوده است. با افزایش بار به صورت تدریجی، ناگهان در یک لحظه با یک صدای نسبتاً بلند دال شکسته و از آن به بعد دیگر نیروی وارده افزایش نیافت. این نیرو همان مقاومت برشی منگنه ای دال است.



شکل (۵): نحوه قرارگیری دال بر روی دستگاه آزمایش

۶- نتایج آزمایش ها

هر یک از دالهای ساخته شده همانطور که توضیح داده شد پس از ساخت توسط جک هیدرولیکی مورد آزمایش قرار گرفته و برای هر نمونه مقدار بار و تغییر مکان نهایی و نحوه تغییرات بار و تغییر مکان بدست آمد. جدول (۳) مقدار بار و تغییر مکان نهایی را برای هر یک از نمونه ها نشان می دهد.

جدول (۳): نتایج آزمایش نمونه ها

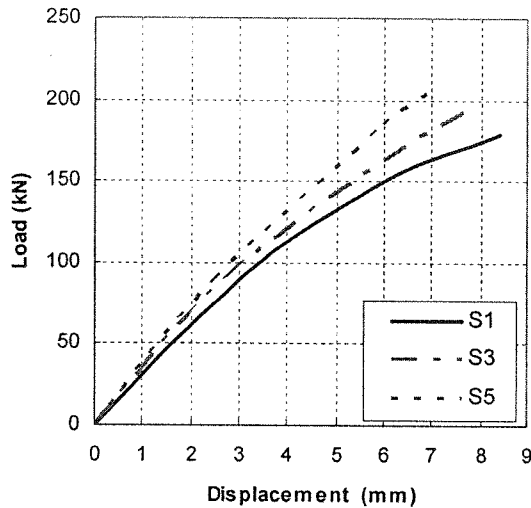
شماره نمونه	f'_c MPa	ρ %	P_{test} kN	P_{flex} kN	$\phi = \frac{P_{test}}{P_{flex}}$	Δu mm
S1	۲۳/۱	۱/۱	۱۷۹	۲۱۷	۰/۸۲	۸/۴
S2	۲۲/۵	۱/۵۸	۱۹۴/۴	۲۷۱	۰/۷۲	۷/۱
S3	۲۲/۴	۱/۱	۱۹۶/۷	۲۲۵	۰/۸۷	۷/۹
S4	۲۱/۷	۱/۵۸	۲۲۰/۲	۲۸۷	۰/۷۷	۶/۵
S5	۴۰/۵	۱/۱	۲۰۸/۵	۲۲۹	۰/۹۱	۷/۱
S6	۴۱/۲	۱/۵۸	۲۳۹/۴	۲۹۵	۰/۸۱	۵/۹

در این جدول f'_c مقاومت فشاری نمونه استاندارد، ρ درصد آرماتور کششی، P_{test} مقاومت برشی پانچینگ بدست آمده از آزمایش، P_{flex} مقاومت نهایی خمشی محاسباتی و Δu تغییر مکان نهایی نمونه ها زیر بار است.

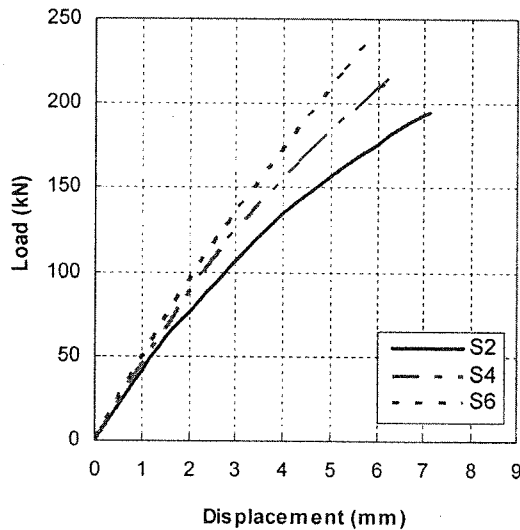
۶-۱- شکل انهدام و نوع ترک ها

همانطور که قبلاً گفته شد با توجه به درصد بالای

فولاد ۱/۱٪ در شکل (۷) و برای نمونه‌های با نسبت فولاد ۱/۵۸٪ در شکل (۸) نشان داده شده است.



شکل (۷): منحنی های بار - تغییر مکان برای دالهای با نسبت فولاد ۱/۱٪



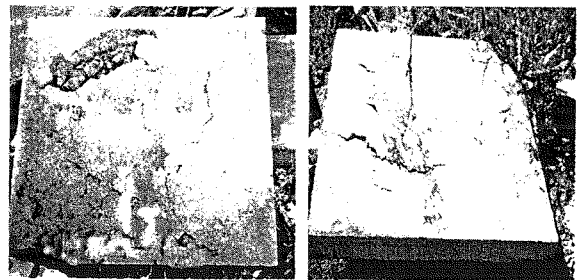
شکل (۸): منحنی های بار - تغییر مکان برای دالهای با نسبت فولاد ۱/۵۸٪

همانطور که از منحنی های فوق مشخص است در دالهای بتن سبک ساخته شده، با افزایش مقاومت فشاری بتن تغییر مکان نهایی دال کاهش یافته ولی مقدار بار نهایی مربوطه افزایش خواهد یافت. بطور مثال در دالهای با نسبت آرماتور ۱/۱٪ با افزایش مقاومت فشاری بتن از ۲۳/۱ به ۳۲/۴ مگاپاسکال مقدار تغییر مکان ۶٪ کاهش و مقدار بار نهایی ۹/۹٪ افزایش می یابد. همچنین با افزایش مقاومت فشاری بتن از ۲۳/۱ به ۴۰/۵ مگاپاسکال مقدار تغییر مکان ۱۵/۵٪ کاهش یافته و

آرماتورهای هر یک از دالها، تمامی آنها به صورت ناگهانی و ترد در برش منگنه ای منهدم شدند. بدین صورت که بعد از اعمال بار به صورت تدریجی، نمونه ها ناگهان با یک صدای مهیب منهدم شده و پس از آن دیگر بار وارده اضافه نشده و کاهش یافت.

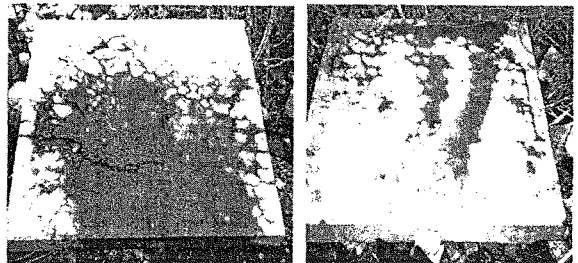
از آنجا که انهدام تمامی آنها از نوع برش منگنه ای بود ترکهای نمونه‌ها به صورت محیطی است و ترکهای شعاعی در آنها بسیار کم مشاهده شد. شکل (۶) نمونه‌ها را پس از شکست نشان می‌دهد.

در توضیح شکل نمونه‌ها بعد از شکست این نکته شایان ذکر است که در نمونه S6 بعد از شکست و افت بار، بارگذاری تا انهدام نمونه ادامه یافته ولی در سایر نمونه‌ها بعد از شکست و افت بار، بارگذاری قطع شده است.



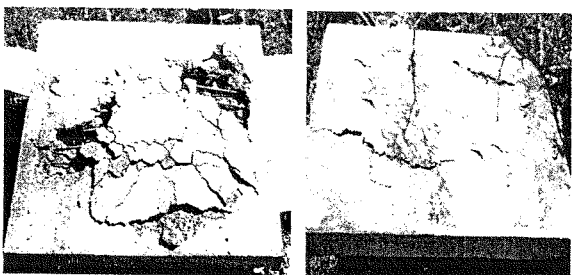
نمونه S3

نمونه S1



نمونه S4

نمونه S2



نمونه S6

نمونه S5

شکل (۶): سطح تحتانی نمونه‌ها پس از شکست

۶-۲- روابط بار - تغییر مکان

منحنی های بار - تغییر مکان برای نمونه های با نسبت

مقدار بار نهایی ۱۶/۵٪ افزوده می شود.

کمیت‌های موثر در آن با هم تفاوت دارند. برای آنکه مقایسه آیین‌نامه‌ها با هم امکان‌پذیر باشد بهتر است کمیته بدون بعد برای بارها به نام ضریب مقاومت تعریف شود. ضریب مقاومت نسبت بین بار نهایی مشاهده شده به ظرفیت باربری آیین‌نامه است. بنابراین متوسط مقدار ضریب مقاومت، ضریب اطمینان فرمول‌های آیین‌نامه را نسبت به بارهای اعمال شده بیان می‌کند بطوری که در صورتی که متوسط ضریب مقاومت خیلی بیشتر از واحد باشد، آیین‌نامه مذکور غیر اقتصادی و در صورتی که متوسط آنها از یک کمتر باشد آن آیین‌نامه غیر قابل اطمینان می‌باشد.

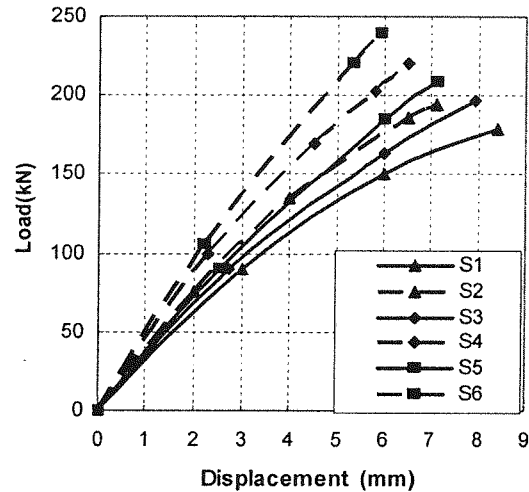
از مقایسه دال‌های بتن معمولی ساخته شده توسط کینیون و نایلندر [۱۰]، الستر و هاگنستاد [۱۱]، روزنتال [۱۲]، گاردنر [۱۳]، تیلور و هایس [۱۴] و لوروچ و مک‌لین [۱۵] با روابط آیین‌نامه‌ها، ضریب مقاومت برای آیین‌نامه‌های CEB-FIP(MC-90)، Eurocode2(EC-2)، ACI-318 و BS8110 و DS-411 به ترتیب ۰/۹۷، ۲/۰۴، ۱/۴۷، ۱/۰۱ و ۰/۹۴ بدست آمده است. همانطور که از ضرایب مقاومت فوق پیداست آیین‌نامه‌های EC-2 و ACI-318 دارای ضریب مقاومت بسیار بزرگتر از واحد بوده و غیر اقتصادی هستند. از طرفی آیین‌نامه‌های MC-90 و DS-411 با ضریب مقاومت کمتر از یک غیر قابل اطمینان هستند. آیین‌نامه BS8110 با ضریب مقاومت ۱/۰۱ نسبت به سایر آیین‌نامه‌ها از دقت بهتری برخوردار است.

۷-۱- مقایسه مقاومت برشی منگنه ای دال‌های بتن

سبک ساخته شده با روابط آیین‌نامه‌ها

از آنجا که اکثر مطالب بیان شده در آیین‌نامه‌ها در مورد برش منگنه ای دالها بر اساس اطلاعات تجربی بدست آمده از نمونه دال‌های بتن معمولی می‌باشد، لذا ضروری است که میزان دقت این روابط را برای دال‌های بتن سبک ساخته شده مورد ارزیابی و بررسی قرار داده و معین کرد که کدامیک از آیین‌نامه‌های موجود برای دال‌های بتن سبک مناسب‌تر می‌باشد. از این رو، در این بخش سعی شده است که نتایج آزمایش ۶ دال ساخته شده با آیین‌نامه‌های DS411، BS8110، EC2، ACI318 و MC90 مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفته و نتیجه گیری شود. شایان ذکر است که مقاومت بدست آمده از آیین‌نامه‌های مختلف برای هر نمونه در جدول (۴) و نسبت مقاومت بدست آمده از آزمایش‌های P_{test} به مقاومت محاسبه شده از روابط آیین‌نامه‌های مختلف در جدول (۵) نشان داده است. شرح و توضیح بیشتر این اعداد همراه با نمودارهای مربوطه در ادامه ارائه خواهد شد.

شکل (۹) اثر افزایش آرماتور کششی دال بر منحنی بار- تغییرمکان را در هر یک از نمونه‌ها نشان می‌دهد. با استفاده از شکل (۹) پیداست که با افزایش آرماتور کششی دال مقدار تغییرمکان نهایی دال کاهش یافته ولی بار نهایی اعمالی افزوده می‌شود. بطور مثال در مقایسه نمونه‌های ۲ و ۱ با افزایش درصد آرماتور از ۱/۱٪ به ۱/۵۸٪ تغییر مکان نهایی ۱۵/۵٪ کاهش و بار نهایی آن ۸/۸٪ افزایش می‌یابد.



شکل (۹): اثر افزایش آرماتور کششی بر منحنی بار - تغییرمکان نمونه‌ها

۶-۳- سختی

با افزایش مقاومت فشاری و درصد آرماتور کششی، میزان سختی دال‌ها افزوده می‌شود. این واقعیت به وضوح در منحنی‌های بار و تغییرمکان نمونه‌ها مشاهده می‌گردد.

۷- مقایسه نتایج آزمایش‌ها با روابط آیین‌نامه‌ها

بیشتر آیین‌نامه‌ها در محاسبه مقاومت برشی منگنه ای از روش سطح کنترل استفاده می‌کنند که می‌توان آن را ناشی از سادگی این روش و کم بودن تعداد پارامترهای دخیل در آن دانست. در روش سطح کنترل دو عامل محیط کنترل و پارامتر مقاومت بتن در محاسبه بار منگنه ای موثر است. محیط کنترل محیطی فرضی است که از لبه ستون در فاصله‌ای مشخص قرار دارد که معمولاً این فاصله ضریبی از عمق موثر یا ضخامت کل دال می‌باشد. پارامتر مقاومت بتن نیز در هر آیین‌نامه مقدار مخصوص به خود را دارد و کمیت‌هایی مانند مقاومت فشاری بتن، درصد آرماتور و عمق موثر می‌تواند در آن دخیل باشد. آیین‌نامه‌ها در نوع محیط کنترل و پارامتر مقاومت بتن و

۷-۲- مقایسه نتایج آزمایش با آیین نامه

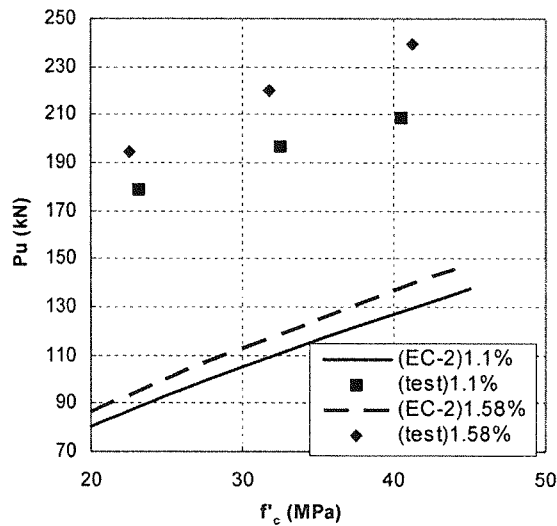
Eurocode2(EC-2)

منحنی های مقاومت برشی منگنه ای در برابر مقاومت فشاری بتن برای نسبت های آرماتور ۱/۱٪ و ۱/۵۸٪ در شکل (۱۰) نمایش داده شده است. برای ترسیم منحنی ها از رابطه زیر که در ابتدای مقاله ارائه شد، استفاده شده است. نتایج نمونه های بتن سبک آزمایش شده نیز برای مقایسه با منحنی آیین نامه EC-2 آورده شده است.

$$P = 4(B+3d)d \times 0.035(1.6-d)(1.2+40\rho)f_c^2 \quad (3)$$

همانطور که از منحنی ها و همچنین نسبت P_{test}/P_{EC-2} ارائه شده در جدول (۵) مشخص است، این آیین نامه مقاومت برشی منگنه ای دال بتن سبک را بسیار محافظه کارانه پیش بینی می کند. نکته دیگر آن که با افزایش مقاومت فشاری بتن میزان محافظه کاری این آیین نامه کم شده به طوری در مقاومت فشاری ۲۲/۵ مگاپاسکال نسبت P_{test}/P_{EC-2} برابر با ۲/۰۹ بوده ولی در مقاومت فشاری ۴۱/۲ مگاپاسکال این نسبت برابر با ۱/۷۲ به دست آمده کهنشان می دهد استفاده از این آیین نامه بخصوص در مقاومت های معمولی باعث طراحی مقاطع غیر اقتصادی و بزرگی خواهد شد. این موضوع در مورد بتن معمولی نیز توسط سایر محققین در گذشته نشان داده شده

است [۱۵]-[۱۰]. در مقایسه با آیین نامه EC-2، همانطور که در جدول (۵) مشخص است، آیین نامه اروپایی MC-90 در خلاف جهت اطمینان مقاومت برشی منگنه ای را پیش بینی می کند. مطابق جدول (۵) میانگین نسبت P_{test}/P_{MC-90} برای نمونه های مختلف برابر ۰/۸۷ است.



شکل (۱۰): مقایسه نتایج نمونه های بتن سبک آزمایش شده با رابطه آیین نامه EC-2

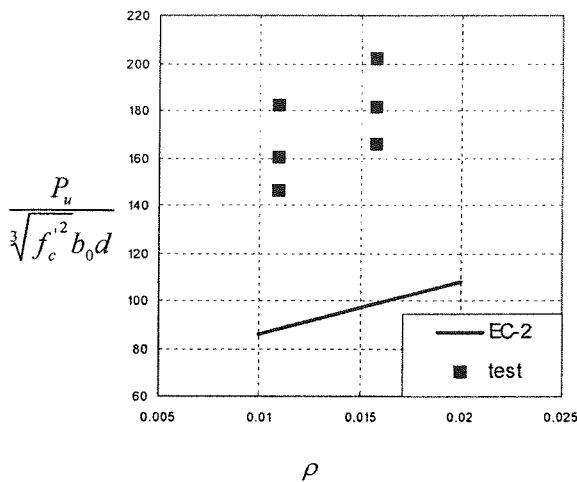
جدول (۴): مقاومت بدست آمده از آیین نامه های مختلف برای هر نمونه

شماره نمونه	f'_c MPa	ρ %	P_{EC-2} (kN)	$P_{ACI-318}$ (kN)	P_{MC-90} (kN)	P_{DS-411} (kN)	$P_{BS-8110}$ (kN)
S1	۲۲/۱	۱/۱	۸۸	۱۱۷	۲۰۵	۱۸۸	۱۳۴
S2	۲۲/۵	۱/۵۸	۹۳	۱۱۲	۲۲۲	۱۸۴	۱۴۵
S3	۳۲/۴	۱/۱	۱۱۱	۱۳۹	۲۳۰	۲۲۳	۱۵۰
S4	۳۱/۷	۱/۵۸	۱۱۷	۱۳۳	۲۴۹	۲۱۸	۱۶۲
S5	۴۰/۵	۱/۱	۱۲۸	۱۵۶	۲۴۸	۲۵۰	۱۶۱
S6	۴۱/۲	۱/۵۸	۱۲۹	۱۵۲	۲۷۲	۲۴۸	۱۷۷

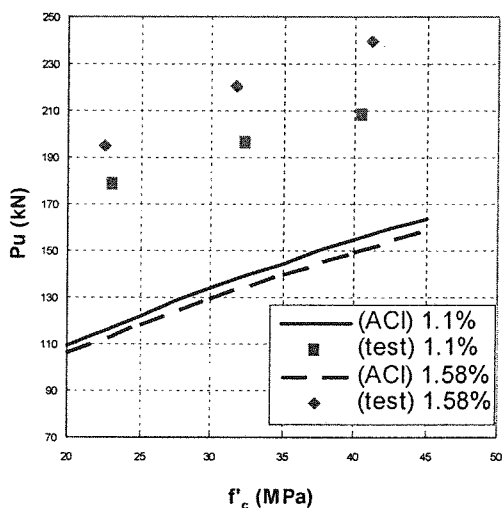
جدول (۵): مقایسه نتایج آزمایشات با روابط آیین نامه ها

شماره نمونه	f'_c MPa	ρ %	$\frac{P_{test}}{P_{EC-2}}$	$\frac{P_{test}}{P_{ACI-318}}$	$\frac{P_{test}}{P_{MC-90}}$	$\frac{P_{test}}{P_{DS-411}}$	$\frac{P_{test}}{P_{BS-8110}}$
S1	۲۲/۱	۱/۱	۲/۰۳	۱/۵۳	۰/۸۷	۰/۹۵	۱/۲۴
S2	۲۲/۵	۱/۵۸	۲/۰۹	۱/۷۴	۰/۸۸	۱/۰۶	۱/۳۴
S3	۳۲/۴	۱/۱	۱/۷۷	۱/۴۲	۰/۸۶	۰/۸۸	۱/۳۱
S4	۳۱/۷	۱/۵۸	۱/۸۸	۱/۶۶	۰/۸۸	۱/۰۱	۱/۳۶
S5	۴۰/۵	۱/۱	۱/۶۳	۱/۳۴	۰/۸۴	۰/۸۳	۱/۳۰
S6	۴۱/۲	۱/۵۸	۱/۷۲	۱/۵۸	۰/۸۸	۰/۹۷	۱/۳۵

آیین نامه EC-2 درصد آرماتور دال را نیز در برآورد مقاومت برشی منگنه ای تاثیر داده است. در شکل (۱۱) منحنی



شکل (۱۱): مقایسه نتایج آزمایش با آیین نامه EC-2 از نظر تاثیر درصد آرماتور در بار منگنه ای



شکل (۱۲): مقایسه نتایج آزمایش با روابط آیین نامه ACI-318

نکته دیگری که باید به آن اشاره کرد این است که آیین نامه ACI-318 درصد آرماتور دال را در محاسبه مقاومت برشی منگنه ای وارد نکرده است و همانطور که در شکل (۱۲) مشاهده می شود این نکته باعث شده است که در دالهای با درصد آرماتور بالا نتایج آزمایش با نتایج این آیین نامه فاصله زیادی پیدا کند. بطور مثال در دال شماره ۱ با نسبت آرماتور ۱/۱٪

نسبت $\frac{P_{test}}{P_{ACI-318}}$ ۱/۵۳ می باشد ولی همین نسبت در دال شماره ۲ با ۱/۵۸٪ آرماتور به ۱/۷۴ رسیده است.

تغییرات پارامتر بدون بعد $\frac{P_u}{\sqrt[3]{f_c'^2} b_0 d}$ در برابر درصد آرماتور، برای این آیین نامه ترسیم و نتایج آزمایش نیز آورده شده است. همانطور که در شکل ملاحظه می شود با افزایش درصد آرماتور، مقاومت برشی منگنه ای دال نیز افزوده می شود، اما شدت این افزایش برای نمونه های مورد آزمایش بیشتر از مقداری است که در این آیین نامه در نظر گرفته شده است. بعنوان مثال با افزایش میزان آرماتور از ۱/۱٪ به ۱/۵۸٪ مقاومت برشی منگنه ای نمونه ها حدود ۹٪ افزوده شده در حالی که مقدار افزایش مقاومت با توجه به این آیین نامه ۶٪ است.

۷-۳- مقایسه نتایج آزمایش با آیین نامه ACI-318

شکل (۱۲) منحنی های مقاومت برشی منگنه ای در برابر مقاومت فشاری بتن را برای نسبت آرماتور ۱/۱٪ و ۱/۵۸٪ نشان داده است. برای ترسیم منحنی ها از رابطه زیر استفاده شده است.

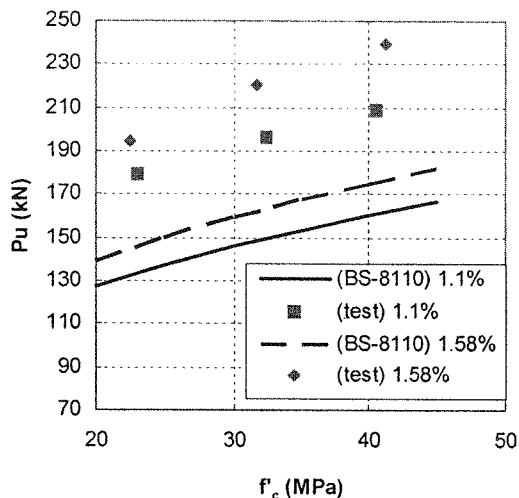
$$P = 4(B + d)d \times 0.332 f_c'^{\frac{1}{2}} \quad (۴)$$

همانطور که در منحنی های شکل (۱۲) مشخص است، مقادیر در نظر گرفته شده در آیین نامه ACI-318 برای برآورد مقاومت منگنه ای دالهای بتن سبک محافظه کارانه است. البته مقدار این محافظه کاری با افزایش مقاومت فشاری بتن کاهش یافته بطوری که در مقاومت فشاری ۲۲/۵ مگاپاسکال نسبت

برابر با ۱/۷۴ و این نسبت در مقاومت فشاری ۴۰/۵

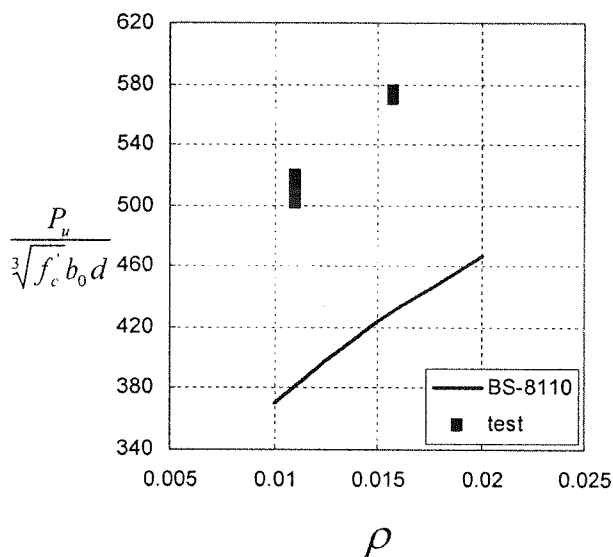
مگاپاسکال برابر با ۱/۳۴ است. در آیین نامه ACI-318 اثر مقاومت فشاری بتن در برش منگنه ای به صورت ضریبی از

$f_c'^{\frac{1}{2}}$ در نظر گرفته شده است. این ضریب با توجه به نتایج آزمایش ها مقداری زیاد بوده و باید کاهش یابد. بطور مثال در شرایط یکسان با افزایش مقاومت فشاری از ۲۲/۵ به ۴۰/۵ مگاپاسکال با توجه به روابط این آیین نامه مقاومت منگنه ای ۳۳٪ افزایش می یابد در حالی که این افزایش برای نمونه های مورد آزمایش ۱۶٪ است.

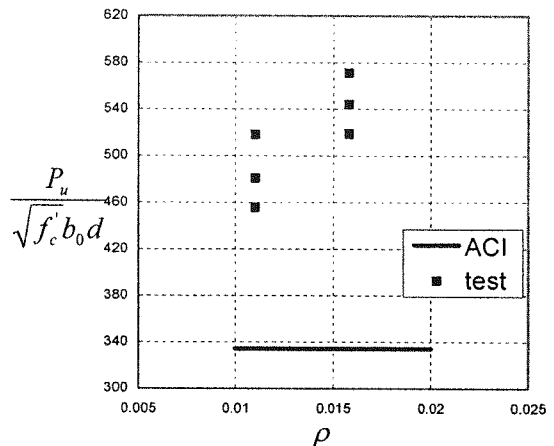


شکل (۱۳): مقایسه نتایج آزمایش با آیین‌نامه BS-8110

این آیین‌نامه درصد آرماتور مصرفی را نیز در بدست آوردن مقاومت برشی منگنه ای تاثیر داده است که این تاثیر متناسب با $\rho^{\frac{1}{3}}$ بوده که منحنی مربوطه و مقایسه آن با نتایج آزمایش در شکل (۱۵) نشان داده است. شایان ذکر است که از لحاظ تاثیر درصد آرماتور در مقاومت منگنه ای نیز این آیین‌نامه نتایج سازگاری با نمونه های مورد آزمایش داشته است.



شکل (۱۵): مقایسه نتایج آزمایش با آیین‌نامه BS-8110 از نظر تاثیر درصد آرماتور بر مقاومت برشی منگنه ای



شکل (۱۴): مقایسه نتایج آزمایش با آیین‌نامه ACI-318 از نظر تاثیر درصد آرماتور در بار منگنه ای

۷-۴- مقایسه نتایج آزمایش با آیین‌نامه BS-8110

یکی از مناسبترین آیین‌نامه‌هایی که در ارتباط با برش منگنه ای دالهای بتن سبک قابل استفاده است، آیین‌نامه BS-8110 می‌باشد. منحنی مقاومت برشی منگنه ای در برابر مقاومت فشاری بتن برای نسبت‌های آرماتور ۱/۱٪ و ۱/۵۸٪ در شکل (۱۴) نمایش داده شده است. نتایج آزمایش‌های دال بتن سبک نیز به منظور مقایسه، به این منحنی‌ها اضافه شده است. مقاومت برشی منگنه ای بر اساس آیین‌نامه BS-8110 برابر رابطه زیر است:

$$P = 4(B + 3d)d \times 0.29 \left(\frac{0.2}{d}\right)^{\frac{1}{4}} (100\rho f'_c)^{\frac{1}{3}} \quad (5)$$

همانطور که از منحنی‌های مربوطه مشخص است این آیین‌نامه از سایر آیین‌نامه‌ها از محافظه‌کاری کمتری برخوردار است. به طوری که نسبت $\frac{P_{test}}{P_{BS-8110}}$ بطور متوسط برابر با ۱/۳۳ می‌باشد. این آیین‌نامه مقاومت منگنه ای را متناسب با $f'_c^{\frac{1}{3}}$ در نظر گرفته که از این لحاظ نیز با نتایج آزمایش سازگاری مناسبی دارد، بطوری که با افزایش مقاومت فشاری بتن از ۲۳/۱ به ۴۰/۵ مگاپاسکال، مقاومت منگنه ای حاصل از روابط این آیین‌نامه ۲۰٪ افزایش یافته که به نتایج آزمایش، یعنی ۱۶٪، نزدیک است.

۸- نتیجه گیری

- [۶] ACI Committee 318, "Use of Concrete in Buildings Design" Manual of Concrete Practice, Specification and Related Topics, Part 3, 2000, pp.171-173
- [۷] British Standard Institution, "Structural Use of Concrete" Standard BS-8110, 1985
- [۸] Dansk Ingeniorforening, "Code of Practice for Structural Use of Concrete" Dansk Standard DS-411, 3rd Edition, 1986
- [۹] Canadian Standards Association (CSA A23.3-M94), "Design of Concrete Structures for Buildings", 1994
- [۱۰] Kinnunen, S. and Nylander, H., "Punching of Concrete Slabs without Shear Reinforcement" Transaction of Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, Nr.158, 1960, pp.1-110
- [۱۱] Elstner, R.C. and Hognestad, E., "Shearing Strength of Reinforced Concrete Slabs" Journal of the American Concrete Institute, V.28, No.1, 1956, pp.29-57
- [۱۲] Rosenthal, I., "Experimental Investigation of Flat Plate Floors" Journal of the American Concrete Institute, V.31, No.2, 1959, pp.153-166
- [۱۳] Gardner, N.J. and Shao, X., "Punching Shear of Continuous Flat Reinforced Concrete Slabs" ACI Structural Journal, V.87, NO.1, 1990, pp.66-71
- [۱۴] Taylor, R. and Hayes, B., "Some Tests on the Effect of Edge Restraint on Punching Shear in Reinforced Concrete Slabs" Magazine of Concrete Research, V.17, No.50, 1965, pp.39-44
- [۱۵] Lovrovich, J.S. and Mclean, D.I., "Punching Shear Behavior of Slabs with Varying Span-Depth Ratio" ACI Structural Journal, V.87, No.5, 1990, pp.507-511
- در این مقاله مقاومت برشی منگنه ای دالهای ساخته شده از بتن سبک بررسی شد. در دالهای بتن سبک نیز همانند دالهای بتن معمولی با افزایش مقاومت فشاری بتن و درصد آرماتور دال، مقاومت برشی منگنه ای و سختی دال افزوده شده ولی تغییر مکان نهایی کاهش می یابد. با توجه به تجزیه و تحلیل نتایج بدست آمده و مقایسه آنها با روابط آیین نامه ها نتایج زیر حاصل می شود:
- ۱- آیین نامه های EC-2 و ACI از محافظه کاری بالایی در بدست آوردن مقاومت برش منگنه ای دالهای بتن سبک برخوردارند و آیین نامه های MC-90 و DS-411 غیر قابل اطمینان هستند.
- ۲- آیین نامه BS-8110 از محافظه کاری کمتری نسبت به آیین نامه های EC-2 و ACI برخوردار بوده و پارامترهای مقاومت فشاری بتن و درصد آرماتور دال را به نحوی مناسب و سازگار با نتایج آزمایش در فرمول تعیین مقاومت برش منگنه ای وارد کرده است. از این رو آیین نامه یکی از آیین نامه های مناسب برای استفاده در دالهای بتن سبک می باشد.
- ۳- در مجموع با توجه به آزمایش های اجرا شده و مقایسه آنها با آیین نامه ها چنین نتیجه می شود که استفاده از پوکه معدنی برای استفاده در ساخت بتن سبک سازه ای مناسب است و با رعایت نکاتی همچون دقت در عمل آوری بتن و استفاده از افزودنی های مناسب می توان به مقاومت های برشی منگنه ای قابل قبولی در دالهای ساخته شده از این نوع سنگدانه سبک دست یافت.

۹- مراجع

- [۱] سازمان برنامه و بودجه، آیین نامه بتن ایران (آبا)، نشریه شماره ۱۲۰، بخش دوم، چاپ سوم، انتشارات سازمان برنامه و بودجه، ۱۳۷۸
- [۲] Holam, Thomas A. and Ries, John P., "Specified Density Concrete", Proceedings, Second International Symposium on Structural Lightweight Aggregate Concrete, Norway, June 2000, pp. 37-46.
- [۳] Olsen, T. O., "Heavy Duty Floating Unit for the Offshore Industry" Proceedings, Second International Symposium on Structural Lightweight Aggregate Concrete, Norway, June 2000, pp. 99-106.
- [۴] Comite Euro-International du Beton et Federation la Precontrainte (CEB-FIP), "Model International de Code for Concrete Structures" MC90 Model Code, 1990
- [۵] European Committee for Standardization (Eurocode 2), "Design of Concrete Structures" General Rules and Rules for Buildings, Part 1, 1991