

بررسی رفتار خمشی دال‌های مجوف دوطرفه با گوی‌های لهیده و کیج‌های فولادی محصورکننده

محسن عموشاهی (دانشجوی دکتری)

مهران زینلیان* (دانشیار)

محمود هاشمی (دانشیار)

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه اصفهان

داود مستوفی‌نژاد (استاد)

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان

فرهنگ فرحبد (دانشیار)

مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی

حامد اسداللهی (کارشناس ارشد)

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تهران

مهندسی عمران شریف، پاییز (۱۳۹۹)
دوری ۲ - ۳۶، شماره ۲/۳، ص. ۳۷-۲۹

در کنار مزایای مختلفی که دال‌های توپر در ساخت سقف‌ها ایجاد می‌کنند، وزن بالای آنها موجب ایجاد مشکلاتی می‌شود. به منظور کاهش مشکلات اشاره شده، سیستم‌های مختلفی با نام دال مجوف دوطرفه معرفی شده است. در بعضی از سیستم‌های مذکور، از گوی‌های پلاستیکی کروی و لهیده، که در کیج‌های فلزی محصور شده‌اند، استفاده شده است، تا بتن غیرمؤثر حذف شود. به دلیل وجود ابهام در عملکرد خمشی سیستم اخیر، در پژوهش حاضر، دو نمونه با مقیاس واقعی با ابعاد $۶۵۰۰ \times ۱۲۰۰ \times ۳۰۰$ میلی‌متر (طول \times عرض \times ارتفاع) ساخته شده است، تا ظرفیت خمشی، ترک‌خوردگی و خیز دال توپر و مجوف با یکدیگر مقایسه شود. در نهایت مشخص شد که مواردی همچون نمودار بار - تغییرمکان، ظرفیت خمشی و مود شکست دو نمونه شبیه یکدیگر است و در مقابل، کیج‌های فلزی موجب افزایش ظرفیت نمونه‌های مجوف می‌شوند. همچنین ظرفیت خمشی نمونه‌ی مجوف با استفاده از روابط ACI ۱۸-۱۴ قابل پیش‌بینی است.

amoushahi@eng.ui.ac.ir
m.zeinalian@eng.ui.ac.ir
M.hashemi@eng.ui.ac.ir
dmostofi@cc.iut.ac.ir
f.farahbod@bhr.ac.ir
hamed.asadollahi@gmail.com

واژگان کلیدی: دال مجوف دوطرفه، دال توپر، رفتار خمشی، گوی لهیده، کیج‌های فولادی.

۱. مقدمه

در دهه‌ی ۱۹۹۰، در اروپا سیستم دیگری با باربری دوطرفه و نام دال مجوف دوطرفه معرفی شده است، که با تفاوت‌هایی در روش ساخت، با عناوین تجاری گوناگونی همچون یو بوت^۱، بابل دک^۲، و کوبیاکس^۳ نیز ثبت شده است.^[۱] در سیستم یو بوت، درون بتن، قطعات مکعبی شکل و پلاستیکی قرار می‌گیرد.^[۲] برخلاف سیستم یو بوت، در سیستم‌های بابل دک و کوبیاکس از گوی‌های لهیده و کروی استفاده می‌شود، که گوی‌های لهیده درون کیج‌های فلزی با قطر سیم ۵ میلی‌متر فیکس می‌شوند.^[۳] قطر و ارتفاع گوی‌ها در دو سیستم اخیر متغیر است و براساس کاربری ساختمان و طول دهانه انتخاب می‌شوند. ارتفاع گوی‌های کروی از ۲۷۰ تا ۴۵۰ میلی‌متر متغیر است، که براین اساس ضخامت تمام شده‌ی دال ساخته شده با آنها از ۴۰۰ تا ۶۰۰ میلی‌متر خواهد بود.^[۴] همچنین ارتفاع گوی‌های لهیده، از ۱۰۰ تا ۲۲۰ میلی‌متر متغیر است و بنابراین ضخامت دال ساخته شده با آنها از ۲۰۰ تا ۳۵۰ میلی‌متر خواهد بود.^[۴]

بر اساس تئوری خمش در مقاطع بتن‌آرمه، با اعمال لنگر مثبت، بالای مقطع

امروزه، یکی از متداول‌ترین روش‌ها برای ساخت سقف در ساختمان‌های بتنی، استفاده از دال توپر است. مزایای سیستم دال توپر، همچون مقاومت فشاری و خمشی بالا، صلبیت بالا، هزینه‌ی پایین نگهداری و مقاومت مناسب در مقابل آتش‌سوزی موجب شده است تا استفاده از دال توپر در جهان متداول باشد. در مقابل، وزن بالای سیستم دال توپر موجب شده است تا استفاده از آن در دهانه‌های بلند دچار مشکل شود. از سوی دیگر، وزن دال توپر با افزایش طول دهانه افزایش می‌یابد و موجب افزایش بار زلزله و در نتیجه افزایش میزان بتن و آرماتور مصرفی می‌شود. از همین رو استفاده از سیستم دال توپر در دهانه‌های بلند با مشکل مواجه شده است. از سوی دیگر، قالب‌بندی راحت دال توپر موجب شده است تا نسبت به دیگر سیستم‌های سقف بتنی، مزیت اقتصادی داشته باشد.

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۸/۱/۳۱، اصلاحیه ۱۳۹۸/۶/۲، پذیرش ۱۳۹۸/۷/۷.

DOI:10.24200/J30.2019.53041.2523

بر روی گوی‌های لهیده صورت گرفته است. از سوی دیگر، در هیچ پژوهشی اثر کیچ‌های نگهدارنده‌ی گوی بررسی نشده است. همچنین بسیاری از پژوهش‌ها بر روی گوی با ابعاد واقعی انجام نشده است. در پژوهش حاضر، تمرکز اصلی بر رفتار دال مجوف با گوی لهیده بوده و اثر کیچ‌های نگهدارنده‌ی گوی‌ها نیز بررسی شده است. در نهایت، نتایج حاصل از آزمایش‌ها با روابط آیین‌نامه‌ی ACI ۳۱۸-۱۴ مقایسه شده است.^[۲۰]

۲. مطالعات آزمایشگاهی

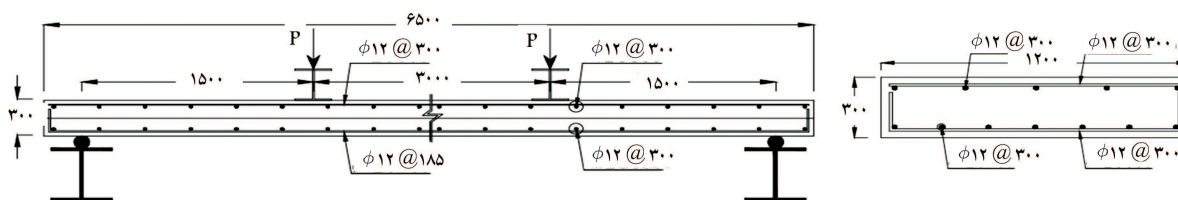
۱.۲. مشخصات نمونه‌ها و مواد استفاده شده

به منظور بررسی رفتار خمشی نمونه‌های دال مجوف، یک نمونه دال توپر و یک نمونه دال مجوف با ابعاد $6500 \times 1200 \times 300$ میلی‌متر (طول \times عرض \times ارتفاع) ساخته شده است. بتن استفاده شده با مقاومت 30 مگاپاسکال بوده و بتن‌ریزی نمونه‌ها در مرحله انجام شده است. همچنین به منظور جلوگیری از حرکت گوی‌های پلاستیکی در هنگام بتن‌ریزی، گوی‌های پلاستیکی در جای خود به وسیله سیم آرماتوربندی فیکس شده‌اند. به منظور اندازه‌گیری مقاومت فشاری بتن استفاده شده، نمونه‌گیری بر اساس دستورالعمل ASTM C ۳۹ انجام و آزمایش مقاومت فشاری نیز مطابق با دستورالعمل ASTM C ۳۹ انجام شده است.^[۲۱ و ۲۲]

در شکل ۱، مقطع طولی و عرضی نمونه‌ی مجوف مشاهده می‌شود. در جدول ۱، نیز آرماتورگذاری نمونه‌ها ارائه شده است، که مطابق آن، نمونه‌ی توپر به صورت ۱-B-SOL و نمونه‌ی مجوف به صورت ۱-B-BVS نام‌گذاری شده‌اند. طراحی آرماتورهای نمونه‌ها بر اساس دستورالعمل ACI ۳۱۸-۱۴ به گونه‌ی انجام شده است که در نمونه‌ی مجوف در مقابل شکست برشی، ضریب اطمینانی برابر با $2/5$ وجود داشته باشد.^[۲۰] در شکل ۱، همچنین جزئیات اجرایی، مقدار آرماتور

بتنی تحت فشار و پایین آن تحت کشش قرار می‌گیرد. به دلیل ضعف بتن در کشش، قسمت پایین دچار ترک‌خوردگی می‌شود. در محاسبه‌ی ظرفیت دال‌های مجوف دوطرفه تحت خمش فرض می‌شود که فقط لایه‌ی فوقانی و تحتانی قطعات کروی در باربری نقش دارند. بنابراین دال‌های مجوف به صورت دو صفحه‌ی بتنی، که گوی‌های پلاستیکی را به مانند ساندویچ در بر گرفته‌اند، مدل می‌شوند و در نتیجه قطعات کروی، بتن غیرمؤثر را حذف می‌کنند.^[۵] ظرفیت خمشی دال‌های مجوف توسط پژوهشگران فراوانی بررسی شده است.^[۱۹-۶] در ادامه، نتایج مطالعاتی که بر روی نمونه‌های با مقیاس کامل انجام شده، بررسی شده است. شتکار^۴ و هانچ^۵ (۲۰۱۵)، ظرفیت خمشی و برشی سیستم بابل‌دک را با گوی‌های کروی به قطر 240 و 180 میلی‌متر و نیز اثر استفاده از بتن با مقاومت 25 و 35 مگاپاسکال را بررسی کرده‌اند.^[۶] چانگ^۶ و همکاران (۲۰۱۱)، رفتار دال‌های مجوف با گوی لهیده را به صورت دوطرفه و با استفاده از گوی با ارتفاع 140 میلی‌متر بررسی کردند.^[۷] همچنین چانگ و همکاران (۲۰۱۰)، سختی و ظرفیت خمشی 6 نمونه دال، با ضخامت تمام شده‌ی 210 میلی‌متر را بررسی کردند.^[۸] در مطالعه‌ی دیگری، چانگ و همکاران (۲۰۱۸)، ظرفیت خمشی و سختی نوع خاصی از گوی‌های لهیده را به صورت آزمایشگاهی بررسی کردند و در میانه‌ی گوی، حفره‌ی به قطر 50 میلی‌متر ایجاد شده بود.^[۹] ولیوانیس^۷ و همکاران (۲۰۱۴)، با ساخت دو نمونه‌ی مشابه دال مجوف به طول 6 متر، ظرفیت خمشی دال مجوف را بررسی کردند.^[۱۳] کیم^۸ و همکاران (۲۰۱۰)، نیز ظرفیت خمشی 5 نمونه با ابعاد $3000 \times 1250 \times 250$ میلی‌متر، که در آنها جنس و شکل هندسی گوی‌های متفاوت بود، را بررسی کردند.^[۱۵]

رفتار خمشی دال‌های مجوف تا به امروز توسط پژوهشگران فراوانی بررسی شده است. همان‌گونه که پیش از این نیز گفته شد، در سیستم‌های کوبیاس و بابل‌دک به منظور ایجاد حفره درون بتن، از گوی‌های کروی و لهیده استفاده می‌شود. تا به امروز تمرکز بیشتر کارهای پژوهشی بر روی گوی‌های کروی بوده و مطالعات کمتری



الف) جزئیات اجرایی، (ابعاد به mm است)



ب) تصویری از نمونه‌ی ساخته شده.

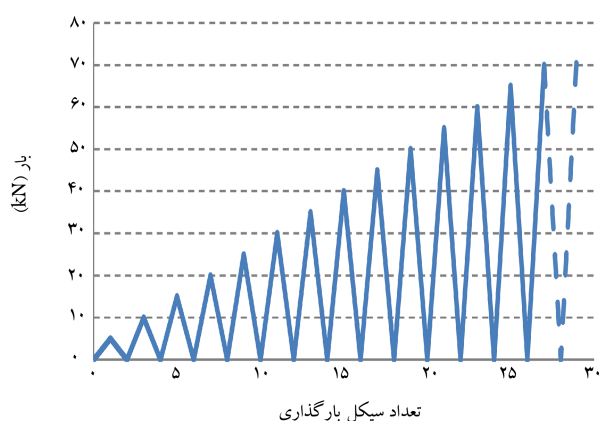
شکل ۱. جزئیات نمونه‌های ساخته شده.

جدول ۱. جزئیات اجرایی نمونه‌های خمشی.

نام نمونه	آرماتور طولی		آرماتور عرضی	
	بالای نمونه	پایین نمونه	بالا و پایین نمونه	توپ استفاده شده است
۱-B-SOL	$\phi 12 @ 300$	$\phi 12 @ 180$	$\phi 12 @ 300$	-
۱-B-BVS	$\phi 12 @ 300$	$\phi 12 @ 180$	$\phi 12 @ 300$	S-۱۸۰

جدول ۲. مشخصات مکانیکی میلگردهای استفاده شده و سیم فلزی اطراف کیچ.

قطر (mm)	محل استفاده شده	کرنش تسلیم (Strain)	تنش تسلیم (MPa)	کرنش نهایی (Strain)	تنش نهایی (MPa)	مدل کشسانی (MPa)
۱۲	آرماتورهای طولی و عرضی	2370×10^{-6}	۴۶۹	0.1634	۶۱۰	201238
۵	کیچهای فولادی	1850×10^{-6}	۳۹۰	0.125	۵۶۵	210812



شکل ۳. نحوه ی بارگذاری نمونه های خمشی در محدوده ی نیرو - کنترل.

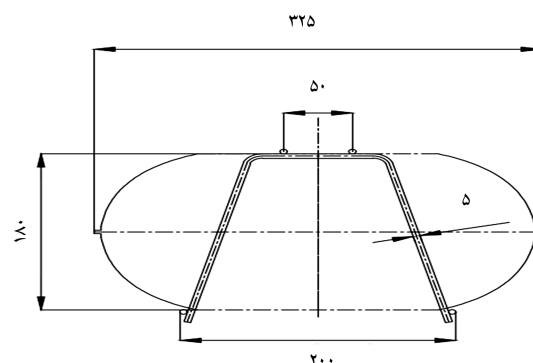
به منظور ثبت تغییرمکان ها از ۹ عدد LVDT استفاده شده است، که موقعیت آنها در شکل ۴ نشان داده شده است. جهت اندازه گیری کرنش آرماتورهای طولی و میله های طولی کیچ های فولادی، از کرنش سنج های شرکت TML استفاده شده است. کرنش سنج آرماتورهای طولی از نوع YFLA-۵-۱۱ انتخاب و کرنش میله های فولادی کیچ ها نیز با استفاده از نوع FLA-۲-۱۷ اندازه گیری شده است. به منظور نام گذاری کرنش سنج ها از روشی که در ادامه شرح داده شده است، استفاده شده است:

- ۱- SG به عنوان اولین حروف در نام گذاری، حروف اول Strain Gauge است.
- ۲- در صورت قرار گرفتن کرنش سنج بر روی آرماتور طولی، از حرف L استفاده شده است.
- ۳- اگر کرنش سنج بر روی آرماتورهای پایین دال نصب شود، حرف B و در صورتی که بر روی آرماتورهای بالای دال نصب شود، حرف T استفاده شده است.
- ۴- در زمانی که در یک موقعیت یکسان از چند کرنش سنج استفاده شود، با شماره گذاری از ۱ تا ۳ تفکیک شده اند.
- ۵- کرنش سنج های نصب شده بر روی کیچ ها با حرف C مشخص شده اند (شکل ۵).

۳. نتایج حاصل از آزمایش

۱.۳. نمودار بار - تغییرمکان

به منظور ایجاد تصویری کلی از عملکرد دال مجوف، نمودار بار - تغییرمکان دو نمونه ی مذکور در شکل ۶ مشاهده می شود، که در آن تغییرمکان اندازه گیری شده مربوط به ۵ LVDT است و محل قرارگیری آن در شکل ۴ مشاهده می شود. در شکل ۷، نیز پوش نمودار بار - تغییرمکان مشاهده می شود، که بر روی آن، سه نقطه ی کلیدی مشخص شده است، که با استفاده از آنها، رفتار هر نمونه به سه محدوده



شکل ۲. مشخصات هندسی گوی پلاستیکی (ابعاد به میلی متر است).

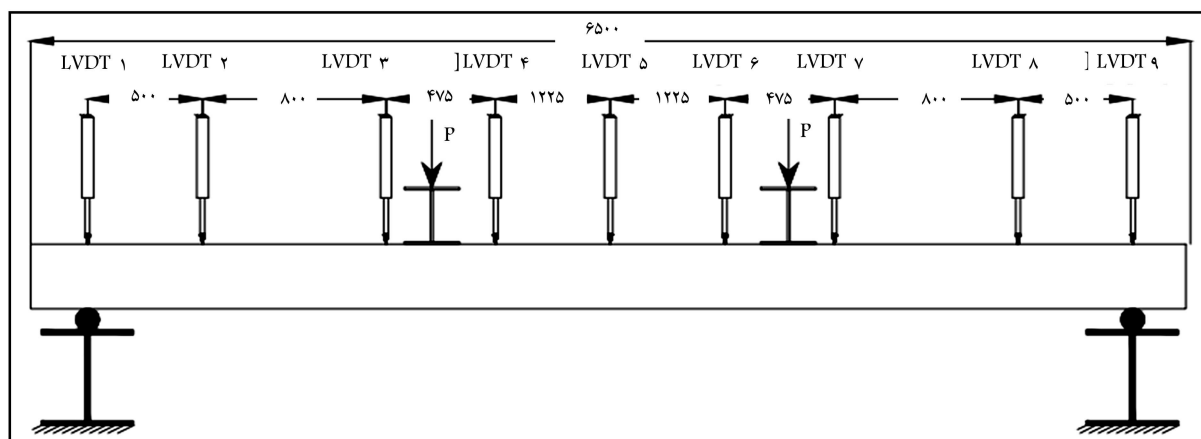
استفاده شده و نحوه ی نام گذاری نمونه ها مشاهده می شود. آرماتورهای استفاده شده و میله های فلزی اطراف کیچ ها نیز مطابق با استاندارد ASTM A ۳۷۰ آزمایش شدند. [۲۳] در جدول ۲، نیز نتایج آزمایش های اخیر ارائه شده است. همچنین، شکل ۲، گوی های فداشونده ی استفاده شده در ساخت نمونه ی مجوف را نشان می دهد. همان گونه که در شکل ۱ نیز نشان داده شده است، بارگذاری به صورت چهارنقطه ای و محل اعمال بار نیز در هر دو نمونه، در 0.25 دهانه است. همچنین تکیه گاه ها به صورت مفصلی در نظر گرفته شده اند. به منظور اعمال بار نیز از جک هیدرولیکی با ظرفیت 300 کیلو نیوتن استفاده شده است.

۲.۲. روش بارگذاری و ابزارگذاری نمونه ها

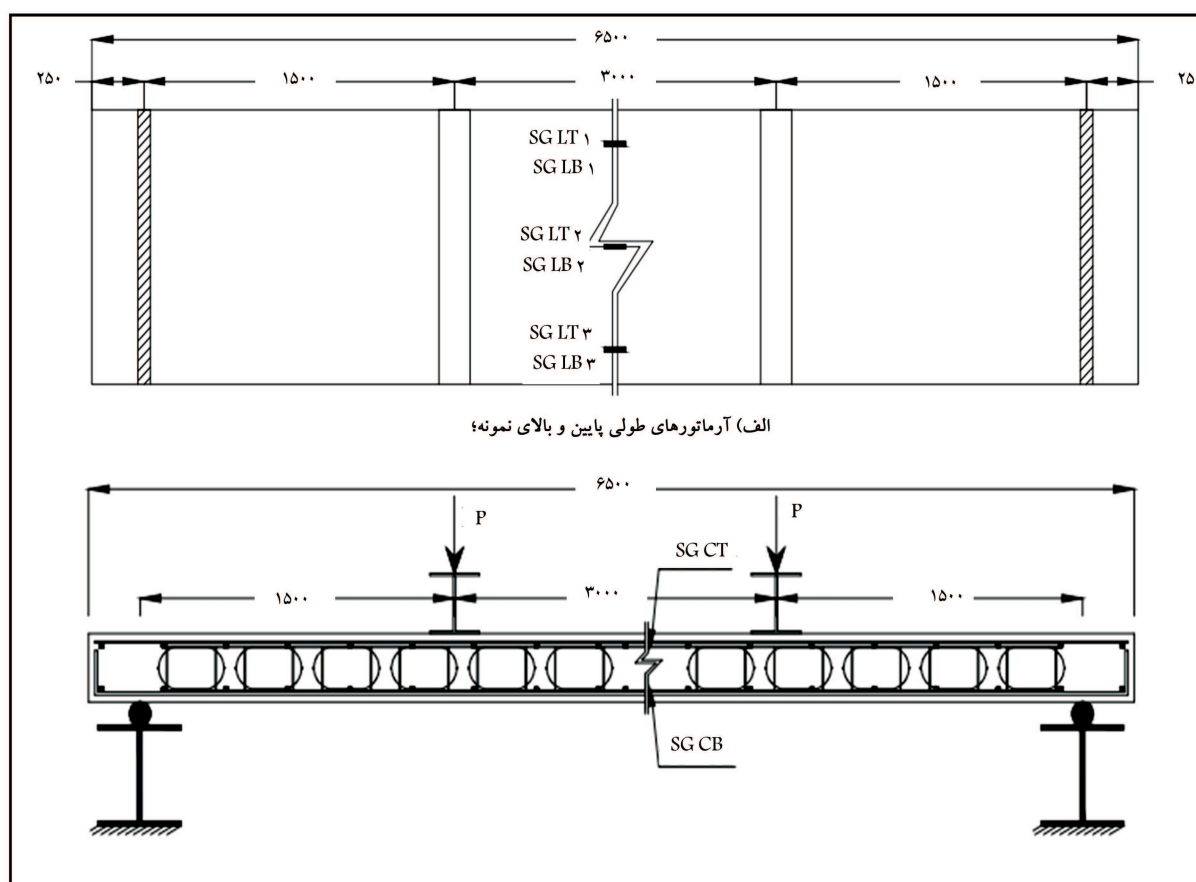
روش بارگذاری نمونه ها بر اساس استاندارد ASTM E۷۲ تنظیم شده است. [۲۴] در بارگذاری از هر دو روش نیرو - کنترل و جابه جایی - کنترل استفاده شده است. در حقیقت از آغاز آزمایش تا تسلیم فولادهای کششی از روش نیرو - کنترل استفاده شده و پس از آن بارگذاری به روش جابه جایی - کنترل ادامه پیدا کرده است. در ادامه، جزئیات نحوه ی بارگذاری در هر یک از دو محدوده ی نیرو - کنترل و جابه جایی - کنترل شرح داده شده است:

الف) نیرو - کنترل: شکل ۳، تابع بارگذاری را در محدوده ی نیرو - کنترل نشان می دهد. در ابتدای آزمایش، 5 kN نیرو به نمونه وارد می شود. سپس نیرو به صفر می رسد و در مرحله ی بعد، 10 kN بار به نمونه اعمال می شود. روند اخیر، تا تسلیم فولادهای کششی ادامه پیدا می کند.

ب) جابه جایی - کنترل: در ابتدای این مرحله، با اعمال بار به تغییرمکان انتهای مرحله ی قبل، 5 میلی متر اضافه می شود. سپس بار به صفر می رسد و مجدداً در سیکل بعدی، بار تا جایی اضافه می شود، که تغییرمکان نمونه 5 میلی متر اضافه شود. این فرایند تا جایی ادامه پیدا می کند که یا نمونه دچار شکست شود و یا تغییرمکان به قدری زیاد شود که نمونه با تکیه گاه یا زمین برخورد کند.



شکل ۴. جزئیات قرارگیری تغییرمکان‌سنج‌ها بر روی نمونه‌های خمشی (ابعاد به میلی متر است).



ب) میله های طولی گچج های فولادی (ابعاد به mm است).

شکل ۵. کرنش‌سنج‌های نصب شده بر نمونه‌ها.

در بار اخیر نشان می‌دهد که میزان ترک‌خوردگی دو نمونه با یکدیگر یکسان است. جدول ۳، تغییرمکان دو نمونه را در بارهای مختلف نشان می‌دهد. بر این اساس، درصد اختلاف تغییرمکان بین دو نمونه در سطوح پایین بار، ۳۵٪ است. با توجه به دقت تغییرمکان‌سنج استفاده شده در میانه‌ی نمونه، که برابر با ± 0.5 میلی‌متر است، درصد اختلاف بالای مورد اشاره قابل توجیه است. در انتهای محدوده‌ی کشسان، اختلاف تغییرمکان بین دو نمونه به ۱۵٪ رسیده است. همان‌گونه که پیش از این نیز ذکر شد، تا بار ۳۰ kN، هیچ‌کدام از دو نمونه، دچار

تقسیم می‌شود، که با حروف A، B و B' بر روی شکل ۷ مشخص و از یکدیگر تفکیک شده‌اند.

الف) محدوده‌ی کشسان

محدوده‌ی کشسان در هر دو نمونه از ابتدای آزمایش تا بار ۲۷ kN نقطه‌ی A، ادامه پیدا کرده است. مجاسبات انجام شده نشان می‌دهد که لنگر اعمال شده به هر دو نمونه، در بار ۳۰ kN برابر با لنگر ترک‌خوردگی شده است. اولین ترک‌ها نیز در همین بار ۳۰ kN در هر دو نمونه مشاهده شده است. بررسی ترک‌خوردگی دو نمونه

ترک خوردگی و کاهش سختی بر اثر ترک خوردگی نشده اند. بر اساس محاسبات انجام شده، ممان اینرسی نمونه کوبیاکس، ۱۵٪ کمتر از نمونه توپر است. همچنین، وزن نمونه مجوف از نمونه توپر، ۲۵٪ کمتر است. بنابراین تغییر مکان کمتر نمونه مجوف نسبت به نمونه توپر، که از جدول ۳ مشخص است، نشان دهنده تأثیر بیشتر کاهش وزن نمونه مجوف نسبت به کاهش سختی آن است.

بر طبق روابط دستورالعمل ACI ۳۱۸-۱۴ [۲۰] و محاسبات صورت گرفته، لنگر نهایی محاسباتی قابل تحمل توسط هر دو نمونه برابر ۹۲/۹۰ kN.m بوده است. با در نظر گرفتن لنگر ناشی از وزن و اعمال بار ۳۰ kN، لنگر وارده به نمونه های B-SOL-۱ و B-BVS-۱ به ترتیب برابر ۴۸/۳۰ kN.m و ۵۸/۵۰ kN.m بوده است. بنابراین با اعمال بار ۳۰ kN، ۵۲٪ لنگر طراحی در نمونه B-BVS-۱ و ۶۳٪ لنگر طراحی نمونه B-SOL-۱ تأمین شده است. بنابراین با وجود آنکه هیچیک از دو نمونه دچار ترک خوردگی و کاهش سختی نشده اند، دست کم ۵۰٪ ظرفیت نهایی محاسباتی آنها محقق شده است.

ب) محدوده قبل از تسلیم

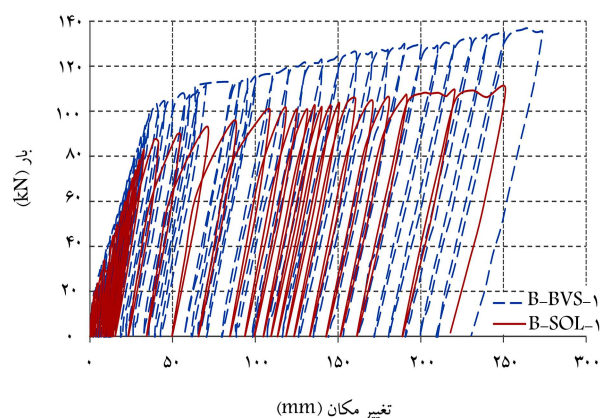
محدوده قبل از تسلیم در هر دو نمونه از نقطه A (بار ۳۰ kN) آغاز می شود. انتهای محدوده قبل از تسلیم، در نمونه B-SOL-۱، بار ۸۵ kN (نقطه B') و در نمونه B-BVS-۱، بار ۱۰۰ kN (نقطه B) است. بررسی پروفیل تغییر مکان دو نمونه با یکدیگر تا بار ۸۵ kN نشان می دهد که تا بار ۸۵ kN، اختلاف تغییر مکان ها با یکدیگر مشابه با بار ۳۰ kN است. پس از بار ۸۵ kN، با توجه به تسلیم شدن میلگردهای کششی در نمونه B-SOL-۱، اختلاف تغییر مکان ها در طول نمونه به شدت افزایش پیدا می کند.

جدول ۳ نشان می دهد که تا بار ۸۵ kN، درصد اختلاف تغییر مکان بین دو نمونه در حدود ۱۰٪ تثبیت شده است. همچنین با وجود سختی کمتر نمونه B-BVS-۱ نسبت به نمونه B-SOL-۱، تغییر مکان نمونه B-BVS-۱، به دلیل وزن کمتر نسبت به نمونه توپر، در بار یکسان کمتر است.

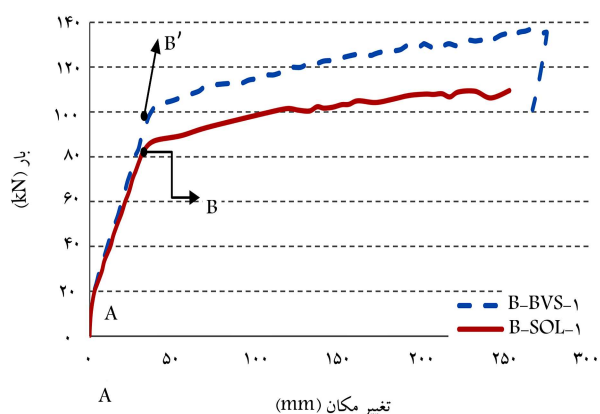
ج) محدوده پس از تسلیم

در نمونه های B-SOL-۱ و B-BVS-۱، محدوده پس از تسلیم به ترتیب از نقطه B' و B آغاز و تا انتهای آزمایش ادامه پیدا کرده است. پس از نیروی ۸۵ kN در نمونه B-SOL-۱ و ۱۰۰ kN در نمونه B-BVS-۱، رفتار نمونه ها تغییر پیدا کرده و سختی هر دو نمونه به شدت کم شده است. با وجود کم شدن سختی نمونه ها، بار قابل تحمل توسط هر دو نمونه افزایش پیدا کرده است. شیب افزایش نیرو در نمونه کوبیاکس، ۱۵٪ و در نمونه توپر ۱۱٪ بوده است. با توجه به نمودار تنش-کرنش میلگردهای مورد استفاده، می توان نتیجه گرفت که دلیل افزایش ظرفیت نمونه ها، سخت شوندگی میلگردهای کششی است. در نهایت، به دلیل چرخش دال و برخورد آن به لبه ی تکیه گاه، آزمایش متوقف شده است.

شکل ۸، وضعیت ترک خوردگی هر دو نمونه را در بار ۸۵ kN نشان می دهد. ترک های مشاهده شده در شکل اخیر بر اساس عکس های گرفته شده در حین آزمایش استخراج شده اند. در حقیقت، در بار ۸۵ kN از هر ۶۰۰ میلی متر نمونه، عکسی تهیه شده است، که بر مبنای آنها، ترک ها در شکل ۸ ترسیم شده اند. بررسی شکل ۸ نشان می دهد که مود شکست هر دو نمونه به صورت خمشی است. همچنین بیشترین ترک خوردگی در دال کوبیاکس در مناطقی به وجود آمده است که گوی ها حضور داشته اند. در حقیقت، نقاط میانی گوی ها، که در آنجا بتن کمترین ضخامت را داشته است، مستعدترین مناطق برای ترک خوردگی هستند. از سوی دیگر، طول ترک های ایجاد شده در نمونه B-BVS-۱ بیشتر از نمونه B-SOL-۱ بوده و عمدتاً تا نزدیک وجه بالای دال ادامه پیدا کرده است. همچنین، در نمونه مجوف،



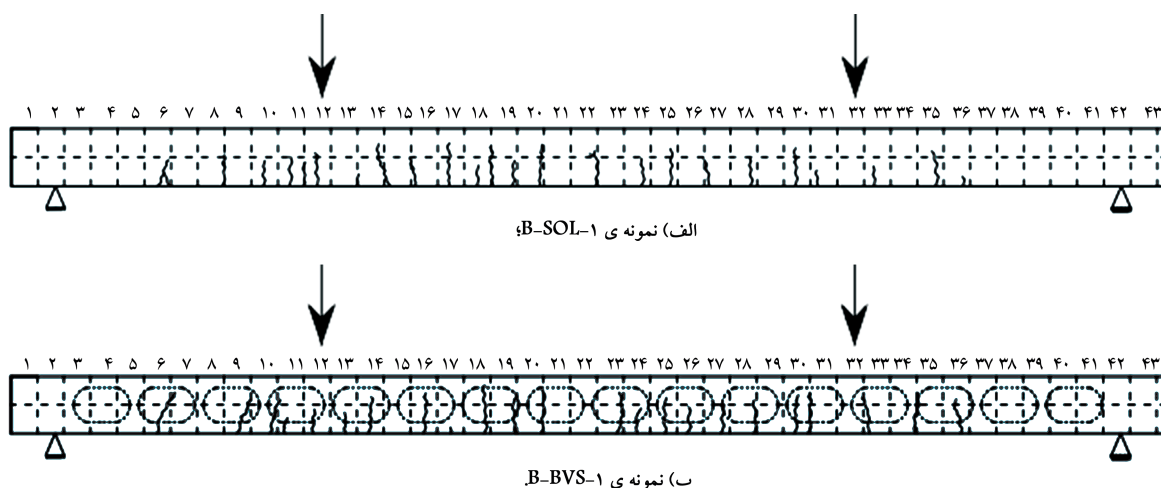
شکل ۶. نمودار بار - تغییر مکان نمونه های خمشی.



شکل ۷. پوش نمودار بار - تغییر مکان نمونه های خمشی.

جدول ۳. درصد اختلاف تغییر مکان نمونه های مجوف و توپر.

بار (kn)	تغییر مکان (mm)		درصد اختلاف (%)
	دال مجوف	دال توپر	
۵	۰/۱۸	۰/۲۸	۳۵
۱۰	۰/۵۰	۰/۷۶	۳۴
۱۵	۱/۴۸	۱/۹۰	۲۲
۲۰	۲/۷۶	۳/۳۰	۱۶
۲۵	۴/۲۰	۴/۸۴	۱۳
۳۰	۶/۰۶	۷/۲۰	۱۵
۳۵	۸/۰۹	۹/۰۵	۱۰
۴۰	۱۰/۲۱	۱۱/۹۰	۱۴
۴۵	۱۲/۳۱	۱۴/۰۹	۱۲
۵۰	۱۴/۸۴	۱۶/۳۹	۹
۵۵	۱۶/۱۹	۱۹/۱۶	۱۱
۶۰	۱۸/۸۳	۲۱/۲۴	۱۱
۶۵	۲۰/۸۹	۲۵/۶۰	۱۸
۷۰	۲۲/۶۱	۲۵/۷۶	۱۲
۷۵	۲۴/۶۶	۲۷/۶۰	۱۱
۸۰	۲۶/۷۸	۲۹/۸۲	۱۰
۸۵	۲۹/۱۶	۳۲/۴۶	۱۰

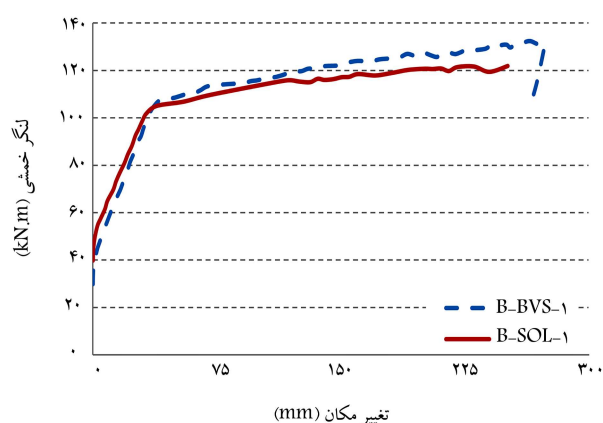


شکل ۸. تصویر ترک‌های ایجاد شده در انتهای آزمایش.

B-SOL-۱ و B-BVS-۱ به ترتیب برابر $۶۵/۷ \text{ kN.m}$ و $۷۵/۱ \text{ kN.m}$ بوده است. برخلاف نمودار بار - تغییرمکان، در شرایطی که لنگر یکسانی به هر دو نمونه وارد شود، تغییرمکان نمونه B-BVS-۱ از نمونه B-SOL-۱ بیشتر است، که دلیل اختلاف مذکور، رفتار حذف اثر وزن و سختی کمتر نمونه مجوف است. در حقیقت از آنجا که دو نمونه B-SOL-۱ و B-BVS-۱ در این مرحله دچار ترک‌خوردگی نشده‌اند، وجود گوی در نمونه مجوف و کاهش سختی ناشی از وجود گوی، موجب افزایش تغییرمکان نمونه مجوف نسبت به نمونه توپر شده است. یکی از عوامل دیگری که در این اختلاف مؤثر است، لنگر بیشتر نمونه توپر در شروع آزمایش به دلیل وزن بیشتر آن است. به عبارت دیگر، در لنگر $۴۰/۵ \text{ kN.m}$ ، بیشینه لنگر ایجاد شده در دال توپر در اثر بار وزن، تغییرمکان دال توپر، صفر و تغییرمکان نمونه مجوف، $۱/۵ \text{ mm}$ بوده است. با وجود آنکه نیروی انتهایی مرحله دوم دو نمونه B-SOL-۱ و B-BVS-۱ در نمودار بار - تغییرمکان متفاوت است، لنگر پایدانی این مرحله در دو نمونه مذکور، تقریباً یکسان است. در حقیقت اختلاف بار در انتهای مرحله دوم در نمودار بار - تغییرمکان، $۱۷/۶\%$ و اختلاف بین لنگر قابل تحمل دو نمونه B-SOL-۱ و B-BVS-۱ در انتهای این مرحله، $۱/۹\%$ است. این مسئله نشان‌دهنده آن است که آرماتورهای کششی دو نمونه تقریباً در یک لنگر تسلیم می‌شود و لنگر قابل تحمل آنها، با در نظر گرفتن اثر بار وزن و در زمان تسلیم شدن آرماتورهای کششی، تقریباً یکسان است.

بر اساس نمودار ارائه شده در شکل ۹، رفتار نمونه‌ها از ابتدای مرحله سوم نسبت به دو مرحله پیش، دچار تغییر شده است. در حقیقت، از ابتدای مرحله سوم، درازاء اعمال لنگر یکسان به هر دو نمونه، تغییرمکان نمونه B-BVS-۱ کمتر از نمونه B-SOL-۱ بوده است. به عنوان نمونه، در لنگر ۱۲۰ kN.m ، تغییرمکان نمونه مجوف، ۱۳۰ mm و تغییرمکان نمونه توپر ۱۹۰ mm بوده است.

دلیل این تغییر رفتار را می‌توان در عملکرد کیچ‌های محصورکننده گوی‌های موجود در نمونه B-BVS-۱ جستجو کرد. به نظر می‌رسد که با ورود نمونه‌ها به مرحله سوم و افزایش ترک‌خوردگی در آنها، در میله‌های کیچ، که موازی با آرماتورهای طولی هستند، نیروی قابل توجهی ایجاد می‌شود. از آنجا که کیچ‌ها، ساختاری خرابایی دارند، توانسته‌اند نمونه مجوف را در این مرحله از نمونه توپر سخت‌تر کنند.



شکل ۹. نمودار لنگر - تغییرمکان نمونه‌های خمشی.

ترک‌های خمشی - برشی در نزدیکی تکیه‌گاه بیش از نمونه توپر مشاهده شده است.

در تغییرمکان ۲۵۰ mm ، به عنوان بیشترین تغییرمکان نمونه B-SOL-۱، نمونه‌های B-SOL-۱ و B-BVS-۱ به ترتیب $۱۰۹/۶ \text{ kN}$ و $۱۳۴/۸ \text{ kN}$ بار تحمل کرده‌اند. این اختلاف $۲۵/۲$ کیلو نیوتنی، $۱۱/۶ \text{ kN}$ بیشتر از اختلاف وزن دو نمونه مذکور است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که نمونه B-BVS-۱، حتی با معادل کردن وزن نیز باربری بیشتری نسبت به نمونه B-SOL-۱ در محدوده پس از تسلیم داشته است. اضافه ظرفیت ذکر شده ناشی از عملکرد میله‌های کیچ‌های محصورکننده گوی‌های در مرحله پس از تسلیم است.

۲.۳. نمودار لنگر - تغییرمکان

در شکل ۹، تغییرات لنگر اعمال شده به نمونه‌ها با تغییرمکان آنها مشاهده می‌شود. در محاسبه لنگر اعمالی به نمونه‌ها، اثر وزن نیز در نظر گرفته شده است، تا در نمودار اخیر، فقط اثر سختی کمتر نمونه B-BVS-۱ نسبت به نمونه B-SOL-۱ بررسی شود. مطابق شکل ۹ مشخص است که سه محدوده معرفی شده در شکل ۷ در نمودار اخیر نیز قابل تشخیص هستند.

با اعمال بار ۳۰ kN به نمونه‌ها، لنگر انتهایی محدوده اول در نمونه‌های

جدول ۴. مقایسه‌ی انرژی جذب شده در نمونه‌های خمشی.

ناحیه‌ی رفتار نمونه	نام نمونه	انرژی جذب شده (kN.m)	درصد اختلاف در انرژی جذب شده نسبت به نمونه‌ی ۱ - $B - BVS$
کشسان	B-SOL-۱	۰/۷۴۱	۸/۱۲
	B-BVS-۱	۰/۶۸۵	
قبل از تسلیم	B-SOL-۱	۱/۷۵۰۴	۱۰/۲۲
	B-BVS-۱	۱/۴۲/۴۸	
پس از تسلیم	B-SOL-۱	۲۱/۷۷۶	-۲۳/۵۰
	B-BVS-۱	۲۸/۴۶۱	

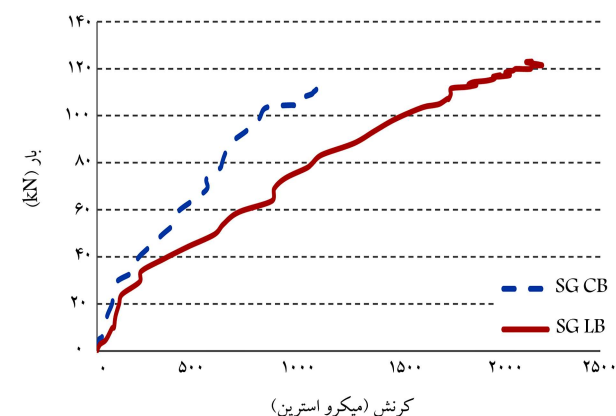
۳.۳. جذب انرژی

یکی از مشخصه‌های اصلی اجزاء سازه‌یی، توان آنها در جذب و استهلاک انرژی است. جهت محاسبه‌ی انرژی جذب شده توسط نمونه در هر سیکل از بارگذاری، سطح زیر نمودار بار - تغییرمکان در هر سیکل، محاسبه شده است.

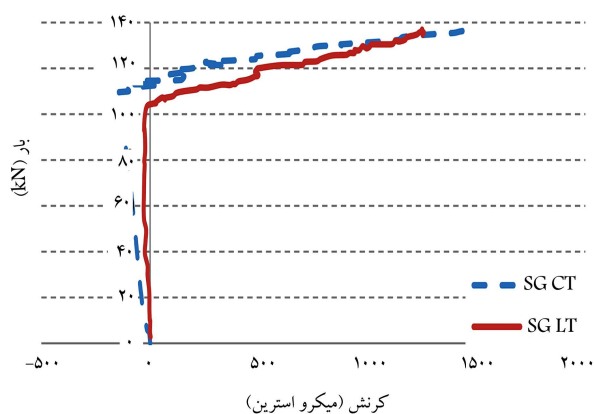
به منظور مقایسه‌ی انرژی جذب شده در طول آزمایش، سطح زیر نمودار هر دو نمونه در جدول ۴ با یکدیگر مقایسه شده است. براساس نتایج ارائه شده، انرژی جذب شده تا اولین افت سختی (مرحله‌ی اول)، در نمونه‌ی ۱-B-SOL، ۸/۱۲٪ بیشتر از نمونه‌ی ۱-B-BVS بوده است. انرژی جذب شده‌ی نمونه‌ی توپر در مرحله‌ی دوم نیز، ۱۰/۲۲٪ بیشتر از نمونه‌ی مجوف بوده است. لازم به ذکر است که در مرحله‌ی دوم، انرژی جذب شده برای هر دو نمونه، در بار ۸۵ kN محاسبه شده است. این بار، نقطه‌ی انتهایی مرحله‌ی دوم در نمونه‌ی توپر است. در مقابل در مرحله‌ی سوم، انرژی جذب شده در نمونه‌ی مجوف نسبت به نمونه‌ی توپر ۲۳/۵٪ بیشتر بوده است. وزن بیشتر نمونه‌ی توپر در دو محدوده‌ی اول، موجب تغییرمکان بیشتر آن در آزمایش و در نتیجه افزایش انرژی جذب شده توسط نمونه‌ی توپر شده است. ادامه‌ی آزمایش، میزان باربری نمونه‌ی مجوف نسبت به نمونه‌ی توپر بیشتر بوده است. افزایش میزان باربری، که به دلیل وزن کمتر نمونه‌ی مجوف و کیج‌های محصورکننده بوده است، موجب شده است تا جذب انرژی نمونه‌ی مجوف ۲۳/۵٪ از نمونه‌ی توپر بیشتر شود.

۴.۳. کرنش آرماتورهای طولی کیج‌ها

به منظور ارزیابی اثر کیج‌ها در باربری نمونه‌ی مجوف در مقطع یکسان، بر روی آرماتورهای طولی نمونه و میله‌های طولی کیج‌ها از کرنش‌سنج استفاده شده است. در شکل ۱۰، مقایسه‌ی کرنش‌های ثبت شده بر آرماتور طولی و میله‌ی طولی کیج در وجه پایین مشاهده می‌شود، که مطابق آن کرنش‌های ثبت شده بر میله‌ی کیج کمتر است. بدیهی است که این امر به دلیل نزدیک‌تر بودن میله‌ی کیج به تار خشی است. در شکل ۱۱، نیز مقایسه‌ی کرنش ثبت شده بر روی آرماتورهای طولی وجه بالایی و میله‌های کیج در آن‌جا مشاهده می‌شود، که مطابق آن در هر دو نمونه، از ابتدای آزمایش و تا نیروی ۱۰۰ kN، کرنش منفی اندکی وجود دارد. نیروی میلگرد و میله‌ی طولی، با تغییر رفتار نمودار بار - تغییرمکان در نیروی ۱۰۰ kN، تغییر جهت داده و کششی شده‌اند. بر اساس آنچه ذکر شد و شباهت رفتار میله‌های طولی کیج‌ها با آرماتورهای طولی می‌توان نتیجه گرفت که میله‌های طولی کیج با وجود آجدار نبودن، مشابه با میلگردهای طولی عمل می‌کنند.



شکل ۱۰. کرنش ثبت شده در میله‌های کیج‌ها و آرماتورهای طولی وجه پایین نمونه‌های خمشی.



شکل ۱۱. کرنش ثبت شده در میله‌های کیج‌ها و آرماتورهای طولی وجه بالایی نمونه‌های خمشی.

۴. مقایسه‌ی نتایج حاصل از آزمایش‌ها با روابط موجود

در دستورالعمل ACI ۳۱۸-۱۴

به منظور بررسی امکان استفاده از روابط دستورالعمل ACI ۳۱۸-۱۴، نتایج حاصل از آزمایش‌ها با ظرفیت خمشی محاسبه شده از روابط دستورالعمل ACI ۳۱۸-۱۴

جدول ۵. مقایسه‌ی لنگر نهایی نمونه‌های آزمایشگاهی در آزمایش با نتایج حاصل از روابط دستورالعمل ۱۴-۳۱۸-ACI.

نام نمونه	ممان تحمل شده در آزمایش (kN.m)	ظرفیت نمونه‌ها با سه فرض ذکر شده بر اساس آیین‌نامه‌ی ۱۴-۳۱۸-ACI (kN.m)		نسبت ظرفیت آزمایشگاهی به ظرفیت محاسبه شده بر اساس آیین‌نامه‌ی ۱۴-۳۱۸-ACI	
		آرماتور پایین (kN.m)	آرماتور پایین و بالا با وجود کیج (kN.m)	آرماتور پایین	آرماتور بالا و پایین
B-BVS-۱	۱۰۵	۹۳٫۵	۹۳٫۸	۰٫۸۹	۰٫۹۹
B-SOL-۱	۱۰۳	۹۳٫۵	۹۳٫۸	۰٫۹۱	-

در جدول ۵ مقایسه شده‌اند. ظرفیت خمشی نمونه‌ها از رابطه‌ی ۱ محاسبه می‌شوند:

$$M_n = \sum A_{s,i} f_{y,i} \left(d_i - \frac{a}{2} \right) + \sum A'_{s,j} f'_{y,j} \left(d'_j - \frac{a}{2} \right) \quad (۱)$$

که در آن، $A_{s,i}$ و $A'_{s,j}$ مساحت آرماتورهای کششی و فشاری و $f_{y,i}$ و $f'_{y,j}$ مقاومت تسلیم آرماتورهای کششی و فشاری d_i و d'_j ارتفاع آرماتورهای کششی و فشاری و a عمق بلوک فشاری است.

در محاسبات آیین‌نامه‌ی فرض شده است که ارتفاع بلوک فشاری بالاتر از گوی‌های قرار گرفته است. همچنین در جدول ۵، ظرفیت خمشی نمونه‌ها بر اساس آیین‌نامه‌ی ۱۴-۳۱۸-ACI با این سه فرض محاسبه شده است:

۱- با در نظر گرفتن فقط آرماتورهای طولی پایین،

۲- با در نظر گرفتن آرماتورهای طولی وجوه بالایی و پایینی،

۳- با در نظر گرفتن آرماتورهای طولی وجوه بالایی و پایینی نمونه‌ها و میله‌های طولی کیج‌های فولادی.

بر اساس روابط آیین‌نامه‌ی، در صورتی که اثر کیج‌های فولادی در نظر گرفته نشود، نسبت لنگر خمشی آیین‌نامه‌ی به لنگر خمشی به دست آمده از آزمایش تقریباً برابر با ۰٫۹۰ است. این نسبت در صورتی که ظرفیت کیج‌های فولادی نیز در محاسبات وارد شوند، به ۰٫۹۹ می‌رسد. این تذکر لازم است که در محاسبات ذکر شده‌ی اخیر فرض شده است که عمق بلوک فشاری بالاتر از گوی قرار گرفته است. عمق بلوک فشاری به شکل گوی و میزان آرماتور قرار گرفته در دال مرتبط است. از همین رو به عنوان اولین گام در کلیه‌ی محاسبات ظرفیت خمشی، عمق بلوک فشاری باید کنترل شود. در صورتی که عمق بلوک فشاری بالاتر از گوی‌های قرار گرفته باشد، می‌توان از روابط آیین‌نامه‌ی ۱۴-۳۱۸-ACI استفاده کرد:

۵. نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، رفتار نمونه‌های مجوف تحت شکست خمشی بررسی شده است. از همین رو ۲ نمونه با مقیاس کامل ساخته و به صورت بارگذاری و باربرداری آزمایش شدند. بر اساس آزمایش‌های صورت‌گرفته، این نتایج به دست آمده است:

۱- بر اساس مشاهده‌های چشمی، اولین ترک‌ها در هر دو نمونه در بار یکسان ایجاد شده است.

۲- محل وقوع ترک‌های اساسی هر دو نمونه شبیه به یکدیگر و مود شکست آنها خمشی بوده است.

۳- نمودار لنگر - تغییرمکان نشان می‌دهد که برخلاف نمودار بار - تغییرمکان، تا لحظه‌ی تسلیم آرماتورهای خمشی، تغییرمکان نمونه‌ی توپر از نمونه‌ی مجوف کمتر است. پس از تسلیم آرماتورهای خمشی در نمودار لنگر - تغییرمکان، رفتار دو نمونه دچار تغییر شده و تغییرمکان نمونه‌ی توپر بیشتر از نمونه‌ی مجوف بوده است. دلیل این رفتار، باربری کیج‌های نگهدارنده‌ی گوی‌های پلاستیکی ارزیابی شده است.

۴- جذب انرژی نمونه‌ی توپر، تا پیش از تسلیم آرماتورهای کششی از نمونه‌ی کوبیاکس بیشتر بوده است.

۵- بررسی کرنش ثبت شده‌ی میله‌های طولی کیج، نشان‌دهنده‌ی مشارکت میله‌های طولی کیج در باربری است. از همین رو به منظور محاسبه‌ی ظرفیت خمشی، توصیه می‌شود از باربری آنها نیز استفاده کرد.

۶- ظرفیت نهایی خمشی هر دو نمونه برابر بوده و با روابط ارائه شده در آیین‌نامه‌ی ۱۴-۳۱۸-ACI نیز هم‌خوانی داشته است.

پانوشته‌ها

1. U-Boot
2. Bubble Deck
3. Cobiax
4. Shetkar
5. Hanche
6. Chung
7. Volivonis
8. Kim

منابع (References)

1. Navisk, J. "On the bubble: placing concrete around plastic voids increases efficiency and reduces costs", *Concr. Constr. Concr.*, 56(12), pp. 20-22 (2011).
2. Churakov, A. "Biaxial hollow slab with innovative types of voids", *Constr. Unique Build. Struct.*, 21(6), pp. 70-88 (2014).
3. Schnellenbach-Held, M. and BubbleDeck, K.P. "New

- ways in concrete building", *Technical University Darmstadt*, **10**, pp.140-150 (1998).
4. Mota, M. "Design guide for voided concrete slabs: an introduction to voided slabs", *1st ed. Concrete Reinforcing Steel Institute*, **32**, pp.41-45 (2014).
5. Lai, T. "Structural behavior of BubbleDeck® slabs and their application to lightweight bridge decks", *Doctoral dissertation, Massachusetts Institute of Technology* (2010).
6. Shetkar, A. and Hanche, N. "An experimental study on bubbledeck slab system with elliptical balls", *Indian JSci. Res.*, **12**, pp. 21-27 (2015).
7. Chung, J.H., Choi, H.K., Lee, S.Ch. and et al. "Flexural capacities of two-way hollow slab with donut type void", *In Proceeding Annu. Conf. Archit. Inst.*, Korea (2011).
8. Chung, L., Lee, S.-H., Cho, S.-H., and et al. "Investigations on flexural strength and stiffness of hollow slabs", *Adv. Struct. Eng.*, **13**(4), pp. 591-601 (2010).
9. Chung, J.-H., Jung, H.-S., Bae, B.-I., and et al. "Two-way flexural behavior of donut-type voided slabs", *International Journal of Concrete Structures and Materials*, **12**(1), pp. 1-13 (2018).
10. Surendar, M., Ranjitham, M. and Scholar, P. "Numerical and experimental study on bubbledeck slab", *Int. J. Eng. Sci. Comput.*, **6**, pp. 5959-5962 (2016).
11. Ali, W.B. and Urgessa, G.S. "Structural capacities of spherically voided biaxial slab (SVBS)", *Struct. Congr. 2014, Reston, VA: American Society of Civil Engineers*, pp. 785-796 (2014).
12. Bindea, M., Moldovan, D. and Kiss, Z. "Flat slabs with spherical voids. part I: prescriptions for flexural and shear design", *Acta Tech. Napocensis Civ. Eng. Archit.*, **56**(1) pp. 67-73 (2013).
13. Valivonis, J., Jonaitis, B., Zavalis, R. and et al. "Flexural capacity and stiffness of monolithic biaxial hollow slabs", *J. Civ. Eng. Manag.*, **20**(5), pp. 693-701 (2014).
14. Ibrahim, A.M. and Ali, N.K. "Salman WD. finite element analysis of reinforced concrete slabs with spherical voids", *Diyala J. Eng. Sci.*, **6**(4), pp. 15-37 (2013).
15. Kim, B.H., Chung, J.H., Choi, H.K. and et al. "Flexural capacities of one-way hollow slab with donut type hollow sphere", *Key Eng. Mater.*, **452-453**, pp. 773-776 (2010).
16. Shafiq Mushfiq, M., Student, P., Shikha Saini, A. and et al. "Experimental study on BubbleDeck slab", *Int. Res. J. Eng. Technol.*, **4**(5), pp. 1000-1005 (2017).
17. Subramanian, K., Bhuvaneshwari, P. and Jabez, N.A. "Flexural behaviour of biaxial slabs voided with spherical HDPP void formers", *Iran J. Sci. Technol. Trans. Civ. Eng.*, **41**, pp. 373-381 (2017).
18. Alfeehan, A.A., Abdulkareem, H.I. and Mutashar, SH. "Flexural behavior of sustainable reactive powder concrete bubbled slab flooring elements", *Chall. J. Struct. Mech.*, **3**(2), pp. 81-89 (2017).
19. Yasseen, H.H. and Oukaili, N.K.A. "Experimental investigations on the strength and serviceability of biaxial hollow concrete slabs", *Iraqi Acad. Sci. J.*, **22**(11), pp. 36-54 (2016).
20. ACI Committee 318, American Concrete Institute, "Building code requirements for structural concrete (ACI 318-14): an ACI standard: commentary on building code requirements for structural concrete (ACI 318R-14)", *an ACI Report* (2014).
21. ASTM International, ASTM C192 / C192M - 16a "Standard practice for making and curing concrete test specimens in the laboratory", *West Conshohocken* (2016).
22. ASTM International, ASTM C39 / C39M - 16a, "Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens", *West Conshohocken* (2016).
23. ASTM International, ASTM A370 - 16, "Standard test methods, West and definitions for mechanical testing of steel products" *Conshohocken* (2016).
24. ASTM international, ASTM E72 - 15, "Standard test methods of conducting strength tests of panels for building construction?", *West Conshohocken* (2015).