

بررسی مدل سازی سازه های دال بتنی دو طرفه با فضاهای کروی مجوف

سیدسهیل مجیدزمانی^۱، یونس جهانی^۲

۱- استادیار، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، بخش مهندسی سازه و ابنیه فنی

۲- کارشناس ارشد مهندسی سازه

s_majidzamani@yahoo.com
majidzamani@bhrc.ac.ir

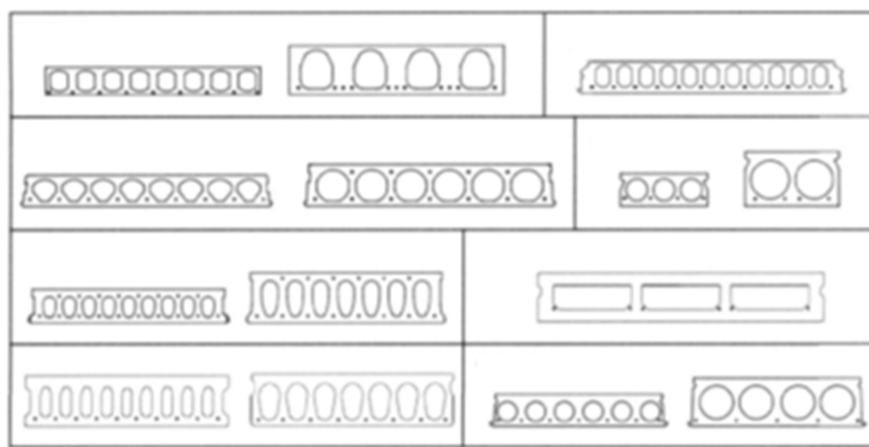
چکیده

دال های بتنی مجوف با استفاده از فضاهای کروی یا شبه کروی توخالی مدتی است که در ایران برای ساخت سقف های سازه ای مورد استفاده قرار گرفته اند. با توجه به کاهش وزن سقف نسبت به دال توپر و نزدیکی مقاومت خمشی دال توپر و مجوف، امکان ساخت سقف با دهانه های بزرگ با دال مجوف بدون تیر وجود دارد. هرچند توصیه هایی برای طراحی این دال ها ارائه شده است ولی هنوز مطالعات کافی مخصوصا در مورد عملکرد سیستم باربر جانبی متشکل از دال مجوف و ستون انجام نشده است. در این مقاله به موضوع ضرایب کاهش سختی خمشی دال مجوف، ستون و دیوار برشی بتنی در ترکیب با یکدیگر پرداخته شده است. این ضرایب برای ایجاد سازگاری میان نتایج تحلیل سازه ترک خورده و رفتار واقعی آن ضروری هستند. به ویژه در مورد دال دوطرفه بتنی در سیستم باربر لرزه ای لازم است این ضریب با دقت از نتایج تحلیل و آزمایش های واقعی به دست آید. در این تحقیق با بررسی مقادیر فرکانس ارتعاش جانبی یک سازه واقعی و خیز قائم سقف مجوف همان ساختمان سعی شده است که نتایج مدل های اجزاء محدود سازه کالیبره شوند. در نتیجه ضریب کاهش سختی خمشی ۰/۴۲ برای دال مجوف حبابی دو طرفه بدست آمده است.

کلمات کلیدی: دال بتنی، دال مجوف، ضریب کاهش سختی، فرکانس نوسان طبیعی

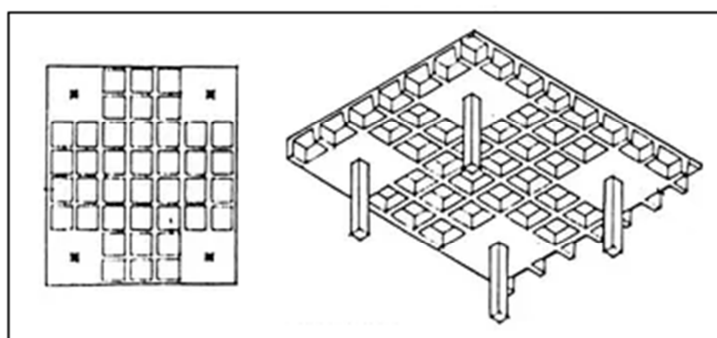
• مقدمه

ایده کاهش وزن دال بتنی از طریق حذف بتن در محدوده های کششی و یا کم فشار مقطع دال خمشی چندین دهه است که در دال های یک طرفه استفاده شده است. فضاهای خالی در دال های یک طرفه به شکل های مختلفی قابل تامین است که نمونه هایی از آن در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱- انواع مقاطع دال‌های خمشی مجوف یک‌طرفه

استفاده از حجم‌های شبه استوانه که در دال‌های مجوف یک‌طرفه مرسوم است، در دال دو طرفه مقدور نیست. اولین دال دو طرفه نیمه مجوف، سقف معروف Waffle Slab است که در شکل ۲ نشان داده شده است.

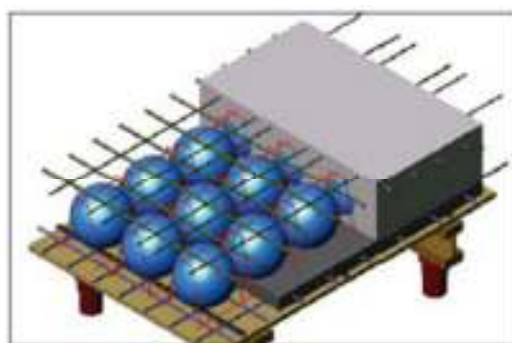


شکل ۲- دال دوطرفه مجوف با تیرچه‌های متعامد (Waffle Slab)

دال‌های دو طرفه کاملاً مجوف با استفاده از قطعات مکعبی شکل که قبل از بتن‌ریزی کار گذاشته می‌شوند، قابل ساخت است که نمونه آن در شکل ۳ دیده می‌شود. واقعیت این است که سیستم‌های نشان داده شده در شکل‌های شماره ۲ و ۳ متشکل از تیرچه‌های متعامد هستند و محاسبات حاکم بر سیستم‌های تیرریزی شبکه‌ای (gridwork) در مورد آن‌ها نیز صادق است. گروه دیگری از سقف‌های مجوف که از فضاهای کروی استفاده می‌کنند در اوایل دهه نود میلادی در دانمارک ابداع گردید [۶]. در این سیستم توپ‌های مجوف به صورت منظم و به فاصله کم از یکدیگر در سقف چیده می‌شوند و شبکه‌های میلگرد دوطرفه نیز در زیر و روی توپ‌ها نصب می‌شوند. نمونه‌ای از این سیستم در شکل ۴ دیده می‌شود. نام سقف حبابی نیز برای این نوع سقف مجوف در ایران بکار می‌رود. سیستم سقف حبابی در واقع یک دال خمشی دوطرفه است که نمی‌توان آن را به سادگی با سیستم‌های تیرچه متعامد شبیه‌سازی نمود. در سقف‌های مجوف بطور کلی و در سیستم سقف حبابی بطور خاص لازم است در نواحی اطراف ستون از دال توپر بهره‌گیری شود تا ضعف برشی دال مجوف موجب تخریب سقف نشود.



شکل ۳- دال دوطرفه مجوف با تیرچه‌های متعامد و فضاهای مکعبی



شکل ۴- دال دوطرفه مجوف با فضاهای کروی (سقف حبابی)

سیستم دال دو طرفه در ترکیب با ستون‌ها یک قاب ساختمانی تشکیل می‌دهد که به علت دارا بودن صلبیت خمشی در محل اتصالات می‌تواند لنگر خمشی ناشی از تغییرشکل ثقلی یا جانبی قاب را تحمل کند. کاربرد سیستم قاب خمشی متشکل از ستون و دال بتنی تحت بار لرزه‌ای به علت امکان تغییرشکل جانبی زیاد و عدم شکل‌پذیری کافی اتصالات دال و ستون برای مناطق با خطر زلزله زیاد نامناسب است و باید از همراهی سیستم‌های باربر جانبی دیگر نظیر دیوار برشی استفاده شود.

هدف اصلی این پژوهش بررسی رفتار ثقلی و لرزه‌ای دال حبابی ترک‌خورده در مقایسه با دال توپر می‌باشد. در این پژوهش از نرم‌افزار اجزاء محدود AxisVM استفاده شده است که قابلیت مدل‌سازی واقعی دال‌های حبابی را دارد و می‌تواند گوی‌های پلاستیکی را در محل واقعی آن‌ها شبیه‌سازی نماید. علاوه بر این، کالیبراسیون نتایج نرم‌افزار با نتایج آزمایش یک نمونه ساختمان با ابعاد واقعی صورت گرفته است. لذا نتایج حاصل از این پژوهش می‌تواند برای سایر ساختمان‌های ساخته شده با دال حبابی تعمیم داده شود و برای طراحی و اجرای این سیستم استفاده گردد.

• آشنایی با نکات فنی کلیدی سقف مجوف حبابی

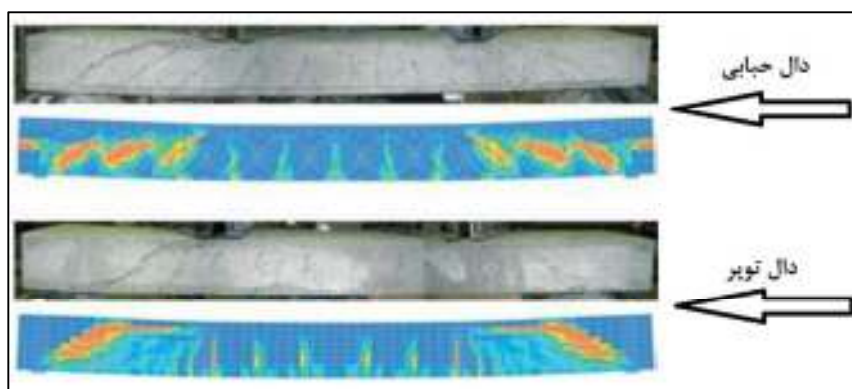
در جدول ۱ پارامترهای مهم برخی نمونه‌های سقف حبابی بر اساس اطلاعات ارائه‌دهندگان این سیستم نشان داده شده است. نکته فنی مهم این است که صلبیت خمشی دال حبابی در حدود ۰/۸۸ دال توپر و مقاومت برشی

آن در حدود ۰/۶ دال توپر ارزیابی شده است [۱]. علت این کاهش، حذف بتن از ناحیه میانی مقطع دال است که بیشترین تاثیر را بر مقاومت برشی دال بر جای می گذارد.

جدول ۱. ویژگی های عمومی دال مجوف حبابی [۲]

ضخامت دال	قطر گوی پلاستیکی (mm)	دهانه دال (برای دال های چند دهانه) (m)	بیش ترین طول طره (m)	دهانه دال (برای دال های یک دهانه) (m)	جرم دال تمام شده (Kg/m ²)	حجم بتن مصرفی (m ³ /m ²)
230	180	5 - 8.1	2.2	5 - 6.3	370	0.11
280	225	7 - 10.1	2.7	6 - 7.8	460	0.14
340	270	9 - 12.5	3.3	7 - 9.6	550	0.18
390	315	10 - 14.4	3.8	9 - 11.1	640	0.21
450	360	11 - 16.7	4.5	10 - 12.5	730	0.25

در مطالعات تحلیلی و آزمایشگاهی تفاوت جالبی بین دال مجوف حبابی و دال توپر از لحاظ توزیع تنش و گسترش ترک های خمشی مشاهده شده است [۳]. در هر دو نمونه دو شبکه از میلگرد در بالا و پایین مقطع قرار داده شده است. در دال حبابی، گوی ها ۸۰ درصد طول دال را اشغال نموده اند که همین امر سبب کاهش وزن دال تا ۴۸ درصد شده است. در شکل ۵ دیده می شود که در هر دو نمونه بیشترین تنش در گوشه ها ایجاد شده است. در دال حبابی بیشترین تنش در گوی های کناری متمرکز شده است و این تنش به سطوح نزدیک نشده است و همین امر سبب کاهش امکان ظهور ترک در سطح بتن شده است.



شکل ۵. مقایسه توزیع ترک های خمشی در دال حبابی و توپر

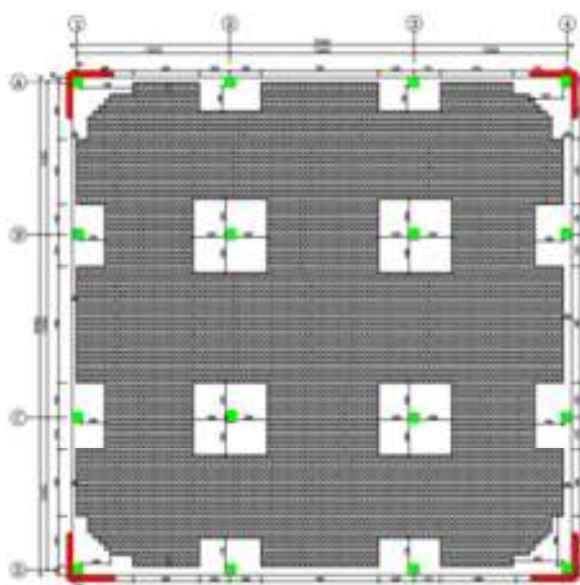
• مشخصات نمونه مورد بررسی

در یک اقدام بی سابقه، نمونه ای با مقیاس واقعی از سقف دال حبابی در مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی برای آزمایش بارگذاری ثقلی ساخته شده است. این سازه یک طبقه دارای سیستم باربر جانبی متشکل از دال حبابی و ستون بعلاوه دیوار برشی بتنی است. تراز شکل پذیری لرزه ای متوسط برای طراحی جزئیات سازه ای در نظر گرفته شده

است. بتن مصرفی در این پروژه دارای میانگین مقاومت فشاری ۴۰ مگاپاسکال روی نمونه مکعبی می‌باشد. برای شبکه فولادی نیز از میلگرد پرمقاومت A4 با مقاومت تسلیم ۵۲۰ مگاپاسکال استفاده شده است. پلان ساختمان موردنظر دارای مساحت ۱۰۲۴ مترمربع می‌باشد و دارای ۳ دهانه در هر جهت می‌باشد که اندازه دو دهانه‌ی کناری ۱۰ متر و اندازه دهانه وسطی ۱۲ متر می‌باشد. ارتفاع ستون‌ها ۵/۲ متر و ابعاد مقطع ستون‌ها ۶۰ سانتی‌متر در ۶۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شده است که دارای ۱۲ میلگرد طولی با قطر ۲۰ میلی‌متر می‌باشد. پلان ساختمان در شکل ۶ نشان داده شده است. در چهار گوشه پلان چهار دیوار برشی L شکل به طول ساق ۳ متر تعبیه شده است که با ستون‌های گوشه پلان ترکیب شده‌اند. ضخامت دال حبابی سیستم کوبی‌اکس برابر ۴۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شده است که توپ‌های به ارتفاع ۲۷۰ و قطر ۳۱۵ میلی‌متر در فواصل آزاد ۵۰ میلی‌متر در آن بکار رفته است. در اطراف سرستون‌ها تا فاصله ۱/۵ الی ۲/۰ متر دال به صورت توپر اجرا شده است تا خطر برش پانچ برطرف گردد.

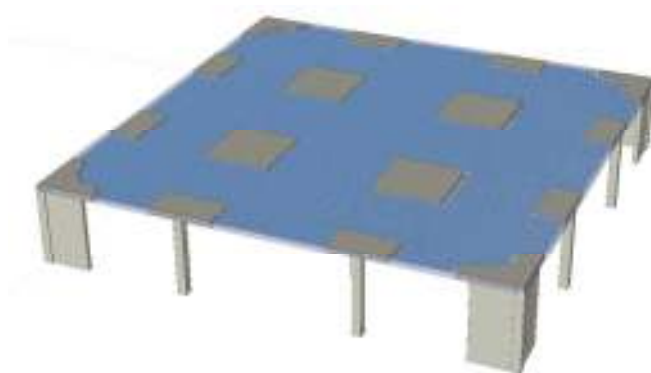
• مدل‌سازی سازه حبابی ساخته شده در مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی

بر اساس اطلاعات موجود از نمونه مقیاس واقعی سازه با دال حبابی کوبی‌اکس، این ساختمان با روش اجزاء محدود مدل‌سازی شد که تصویر مدل در شکل ۷ نشان داده شده است. با توجه به هدف اصلی از مدل‌سازی که برآورد پرید نوسان طبیعی سازه تحت ارتعاشات محیطی است، صرفاً ویژگی‌های ارتجاعی مواد در تحلیل مقادیر ویژه دینامیکی منظور شد. ستون‌ها توسط المان frame به طول ۰/۵ متر مدل شدند و ابعاد و عناصر متشکله آن‌ها از جمله بتن و میلگردهای فولادی در مقطع المان معرفی شد. دال بتنی و دیوار برشی با المان‌های shell چهارگرهی به ابعاد حدوداً ۰/۵ در ۰/۵ متر مدل شدند. از توانایی نرم‌افزار AxisVM در محاسبه ضخامت المان shell برای تامین ممان اینرسی معادل دال مجوف دو طرفه استفاده شد. بخش‌هایی از دال در اطراف ستون‌ها برای تحمل برش پانچ به صورت توپر مدل شد که در سازه واقعی نیز چنین است. همه اتصالات بصورت گیردار مدل شده‌اند.



شکل ۶. پلان سازه مورد بررسی

یکی از مهم‌ترین نکات مدل‌سازی سازه‌های بتنی، برآورد درست از سختی خمشی اعضاء سازه‌ای است. مطابق با آیین نامه بتن ایران (آبا)، ممان اینرسی تیرها، ستون‌ها و دیوارها را می‌توان به ترتیب در ضریب 0.7 ، 0.35 و 0.7 یا 0.35 ضرب نمود تا اثرات ترک خوردگی اعضاء در محاسبه سختی سازه در نظر گرفته شود [۴]. در آیین نامه ACI318-14 نیز مقادیر مربوط به ممان اینرسی ترک خوردگی اعضاء به دو روش ارائه شده‌اند که در جدول ۲ نشان داده شده است [۵]. نکته جالب این است که در آیین‌نامه ACI318-14 قید شده است که در مورد دال‌های دو طرفه سیستم متشکل از دال و ستون بدون تیر لازم است که ضریب کاهش ممان اینرسی مقطع دال از نتایج تحلیلی و آزمایشگاهی دقیق تعیین گردد.



شکل ۷. تصویر سه بعدی مدل اجزاء محدود ساختمان نمونه کوبپاکس

جدول ۲. خلاصه ضوابط اصلاح سختی خمشی در ACI318-14

عملکرد اصلی عضو	ممان اینرسی	مساحت سطح مقطع
دیوار	ستون	$1.0 A_g$
	ترک نخورده	
	ترک خورده	
	تیر	
	دال	
	$0.7 I_g$	
	$0.7 I_g$	
	$0.35 I_g$	
	$0.35 I_g$	
	$0.25 I_g$	

مطابق با توصیه های آیین نامه های مذکور، برای مدل سازی ساختمان مورد نظر در نرم افزار، ممان اینرسی ستون ها در ضریب 0.7 و ممان اینرسی دیوارها در ضریب 0.35 و ممان اینرسی دال حبابی در ضرایب 0.25 و 0.35 و 0.42 و 0.5 ضرب شد تا پس از بررسی و مقایسه با نتایج حاصل از سازه واقعی، ضرایبی که بهترین مطابقت را با نتایج آزمایش داشته باشند انتخاب گردد.

از دو روش برای کالیبراسیون مدل استفاده شد که شامل بررسی فرکانس نوسان طبیعی سازه در دوراستای متعامد افقی و بررسی خیز قائم دال حبابی تحت اثر بار مرده سازه‌ای بوده است.

برآورد فرکانس طبیعی سازه به روش ارتعاش محیطی و با تجهیزات ساخت شرکت Kinematics صورت گرفت. ارتعاشات آزاد سازه در بازه‌های زمانی چند دقیقه‌ای ثبت شد و سپس با انجام آنالیز فوریه مقادیر فرکانس‌های متناظر با حداکثر دامنه پاسخ شناسایی شد. برای بررسی تاثیر ضرایب مختلف ترک خوردگی نیز ده مدل در نرم افزار اجزاء محدود ساخته شد و نتایج با یکدیگر مقایسه شد. جدول ۳ مقادیر فرکانس نوسان طبیعی از روش آزمایش ارتعاش محیطی و روش تحلیل اجزاء محدود را نشان می‌دهد. صحت برآورد فرکانس نوسان طبیعی تاثیر مهمی در تحلیل دینامیکی سازه به روش ترکیب مود و یا تاریخچه زمانی دارد. از سوی دیگر، با توجه به ابعاد بزرگ دال حبابی و اهمیت کنترل خیز قائم سقف لازم است که مدل سازه بتواند خیز سقف را با تقریب خوب ارائه کند. در این راستا اندازه‌گیری خیز سقف قبل و بعد از برچیدن پایه‌های اطمینان قالب سقف انجام شد و نتایج آن به همراه نتایج خیز سقف از مدل تحلیلی در جدول ۴ ارائه شده است.

جدول ۳. مقایسه فرکانس طبیعی سازه از روش تحلیلی و آزمایشگاهی

فرکانس طبیعی افقی حاصل از سازه واقعی (هرتز)	فرکانس طبیعی قائم حاصل از سازه واقعی (هرتز)	فرکانس طبیعی افقی حاصل از نرم افزار (هرتز)	فرکانس طبیعی قائم حاصل از نرم افزار (هرتز)	ضریب ترک خوردگی دال	ضریب ترک خوردگی دیوار	ضریب ترک خوردگی ستون	شماره مدل
		6.36	3.3	0.25	1	1	S1
		6.72	3.87	0.35	1	1	S2
		6.95	4.22	0.42	1	1	S3
		7.26	4.58	0.5	1	1	S4
		7.54	6.3	1	1	1	S5
5.2	5.6	4.77	3.27	0.25	0.35	0.7	S6
		5.04	3.83	0.35	0.35	0.7	S7
		5.15	4.17	0.42	0.35	0.7	S8
		5.24	4.52	0.5	0.35	0.7	S9
		5.55	6.22	1	0.35	0.7	S10

جدول ۴. مقایسه خیز قائم سقف از روش تحلیلی و آزمایشگاهی

تغییر مکان وسط دهانه حاصل از سازه واقعی (میلی متر)	تغییر مکان وسط دهانه حاصل از نرم افزار (میلی متر)	ضریب ترک خوردگی دال	ضریب ترک خوردگی دیوار	ضریب ترک خوردگی ستون	شماره مدل
	26.7	0.25	1	1	S1
	19.2	0.35	1	1	S2
	16.1	0.42	1	1	S3
	13.6	0.5	1	1	S4
	7.1	1	1	1	S5
19	26.5	0.25	0.35	0.7	S6
	19.1	0.35	0.35	0.7	S7
	15.9	0.42	0.35	0.7	S8
	13.5	0.5	0.35	0.7	S9
	7.0	1	0.35	0.7	S10

همانطور که در جداول بالا نشان داده شده است برای مدل‌سازی ساختمان با دال حبابی از ضرایب کاهش سختی مختلفی استفاده شده است. برای آنالیز دال حبابی تحت بار ثقلی، استفاده از ضریب $0/35$ برای دال بهترین مطابقت را با نتایج سازه واقعی دارد (مدل‌های $S2$ و $S7$). با توجه به اینکه هدف از این پژوهش بررسی رفتار لرزه‌ای دال‌های حبابی می‌باشد لذا ضرایبی ملاک عمل قرار می‌گیرد که بتواند هر دو پارامتر فرکانس طبیعی و تغییرمکان را تا حد امکان درست تقریب بزند. با مقایسه بین نتایج حاصل از سازه واقعی و نرم افزار چنین بنظر می‌رسد که نمونه $S8$ با ضریب ترک خوردگی $0/42$ برای دال، $0/35$ برای دیوار و $0/7$ برای ستون بهترین مطابقت را می‌تواند با نتایج سازه واقعی داشته باشد زیرا علاوه بر تقریب خوب نتایج فرکانس محیطی در جهت افقی، تغییرمکان وسط دهانه هم را نسبتاً خوب تقریب می‌زند.

• نتیجه‌گیری

در این تحقیق فرکانس‌های نوسان طبیعی ساختمان متشکل از دال مجوف و تیر و دیوار برشی با مقیاس واقعی موجود در مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی به روش ارتعاشات محیطی اندازه‌گیری شد. همچنین خیز قائم دال مجوف تحت بار ثقلی مرده سازه‌ای سقف با وسایل نقشه‌برداری دقیقاً برداشت شد. ده مدل سازه‌ای از این ساختمان در نرم‌افزار اجزاء محدود ساخته شد و در آن‌ها ضریب کاهش سختی خمشی دال بین $0/25$ تا $0/5$ تغییر داده شد. در مدلی که ضرایب کاهش سختی خمشی ستون‌ها برابر $0/7$ ، دیوار $0/35$ و دال $0/42$ فرض شده بود، بیشترین انطباق با نتایج آزمایشگاهی مشاهده شد. با توجه به مقیاس واقعی نمونه و ملحوظ داشتن مشخصات واقعی سازه و مصالح آن در مدل، به نظر می‌رسد که استفاده از این ضرایب ضمن سازگاری با اصول آئین‌نامه‌ای می‌تواند نتایج واقع‌بینانه‌ای در تحلیل سازه‌های متشکل از دال مجوف حبابی و ستون و دیوار برشی تحت بارهای ثقلی و زلزله در بر داشته باشد.

• سپاس‌گزاری

از مدیریت و کارشناسان شرکت پارس‌مان سازه به ویژه جناب آقای مهندس اسدالهی برای در اختیار گذاشتن اطلاعات ساختمان نمونه مقیاس واقعی کوبیاکس در مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی تشکر می‌شود.

• مراجع

- [1] Churakov, A. "Biaxial hollow slab with innovative types of voids." Construction of Unique Buildings & Structures 6 (2014): 70-88
- [2] The biaxial hollow deck. "The way of the new solution". Bubble Deck Design Guide.
- [3] Mehran Vafaei Shalmani. Ultra Lightweight Building. City University London, 2012.
- [4] آئین‌نامه بتن ایران، نشریه شماره ۱۲۰ سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی
- [5] ACI318-14 Building Code Requirements for Structural Concrete, American Concrete Institute, 2014



نهمین کنفرانس ملی بتن ایران
۱۵ و ۱۶ مهرماه ۱۳۹۶
مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی



- [6] US Patent No.5396747 Granted to Jorgen I.Breuning titled “ Plane Hollow Reinforced Concrete Floors with Two-Dimensional Structure”, (Filed 1993),1995