



مقایسه و بررسی خصوصیات دال های مجوف بادکنکی نسبت به دال های توپر و چگونگی طراحی آن

- علی خیرالدین^۱، ماهان قاسمی نقیب دهی^۲، مرتضی دهقان^۳
۱- دانشیار و عضو هیئت علمی دانشکده مهندسی عمران دانشگاه سمنان
۲- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه دانشکده مهندسی عمران دانشگاه سمنان
۳- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه دانشکده مهندسی عمران دانشگاه سمنان

Akheirodin@semnan.ac.ir
Ghasemi.Mahan@Gmail.com
Morteza.Deaghan@Gmail.com

خلاصه

دال مجوف بادکنکی یکی از انواع سقف هاست که استفاده از توپ های پلاستیکی حاوی هوا در آن منجر به سبک سازی در سقف می گردد. در این مقاله به معرفی و چگونگی طراحی این نوع سقف ها و همچنین مقایسه برخی از ویژگی های آن به کمک نرم افزار المان محدود ANSYS، با دال توپر هم ضخامت با آن پرداخته می شود. نتایج نشان می دهد که خیز این نوع سقف ها تقریباً مشابه و ظرفیت برشی آن ۷۲ تا ۹۱٪ ظرفیت برشی دال توپر هم ضخامت با آن می باشد.

کلمات کلیدی: دال مجوف بادکنکی، دال توپر، نرم افزار المان محدود، ظرفیت برشی، بتن آرمه

۱. مقدمه

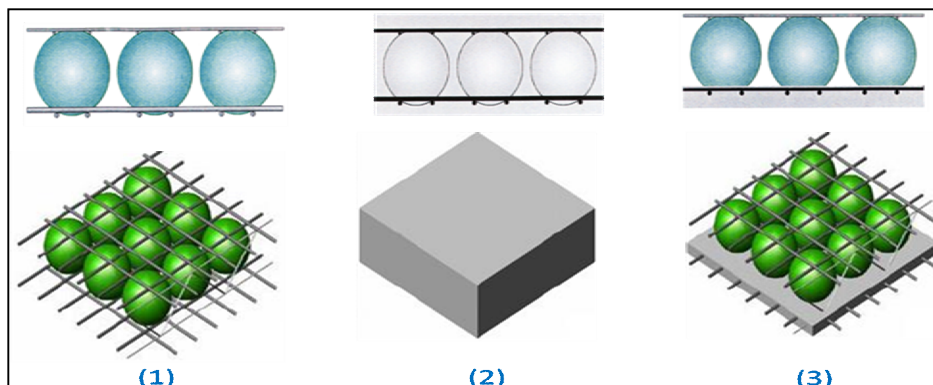
دال مجوف بادکنکی سیستمی است که در واقع چند ماده مختلف اعم از بتن، فولاد، توپ پلاستیکی ساخته شده از پلی اتیلن پرتراکم و هوا را در یک مجموعه تحت عنوان دال مجوف بادکنکی به هم مرتبط می سازد. این سیستم به مثابه دال دو طرفه مجوفی است که در آن توپ های پلاستیکی به منظور حذف بتن غیر باربر و کششی مورد استفاده قرار گرفته است. این نوع دال علاوه بر مطابقت با پلان های معماری گوناگون، به دلیل سبک بودن و کاهش هزینه های ساخت و ساز امروزه مورد توجه بسیاری از مهندسين قرار گرفته است. استفاده از این نوع سقف ها در نهایت منجر به کاهش وزن کلی سازه و همچنین بهبود رفتار سازه در برابر زلزله می گردد.

۲. انواع دال مجوف بادکنکی

دال های مجوف بادکنکی بسته به نحوه ساخت به سه دسته زیر تقسیم می شوند:

- ۱) دال مجوف بادکنکی ساده که مراحل ساخت آن به طور کامل در محل کارگاه انجام می گیرد.
- ۲) دال مجوف بادکنکی کاملاً پیش ساخته که تمام فرآیند ساخت آن در کارخانه صورت می پذیرد و سپس برای استفاده به محل کارگاه ساختمانی حمل می گردد.
- ۳) دال مجوف بادکنکی نیمه پیش ساخته که در آن وجه پایینی با لایه بتنی پیش ساخته اجرا شده و این لایه در ساختمان جایگزین بخش افقی سازه می شود.

در شکل ۱ انواع دال های مجوف بادکنکی نشان داده شده است.



شکل ۱ - انواع دال های مجوف بادکنکی: (۱) ساده (۲) کاملاً پیش ساخته (۳) نیمه پیش ساخته

۳. مزایای دال مجوف بادکنکی

این سیستم در مقایسه با بقیه سقف ها دارای مزایای متعددی می باشد که می توان آن ها را به پنج قسمت عمده طراحی، اقتصادی، ایمنی، زیست محیطی و اجرایی تقسیم نمود:

۳.۱. از نظر طراحی

مزایایی که در بحث طراحی سازه ها توسط دال مجوف بادکنکی می توان بر شمرد عبارتند از:

- کاهش وزن کلی سازه
- افزایش مقاومت سازه
- افزایش طول دهانه ها و کنسول ها
- کاهش تعداد ستونها
- عدم وجود تیر در زیر سقف ها و کتیبه در ستون ها

۳.۲. از نظر اقتصادی

- صرفه جویی در مصرف مصالح در حدود ۵۰٪ (در اجرای دال، ستون، پی)
- کاهش هزینه های حمل و نقل
- جلوگیری از نصب شبکه های آرماتور در محل کارگاه
- ساده تر شدن مراحل نصب و اجرا
- کاهش زمان نصب و اجرا (در حدود ۲۰ تا ۴۰٪)
- کاهش هزینه های حاصل از تغییر در سازه
- شکل پذیری بیشتر سازه ها
- افزایش طول عمر مفید سازه

در نهایت از نظر اقتصادی در حدود ۵ تا ۱۵٪ هزینه ساخت کل اسکلت سازه صرفه جویی می شود.



۳.۳. از نظر ایمنی

- ایمنی در برابر آتش
- ایمنی در برابر زلزله به علت کاهش وزن سازه
- ایمنی در برابر انفجار (اگر اساس طراحی بر مبنای سیستم دال-ستون و حذف دیوار باربر باشد)
- ایمنی در برابر رطوبت به دلیل نفوذ پذیری پایین آن

۳.۴. از نظر زیست محیطی

- صرفه جویی ۵۰ درصدی مصالح خود موجب فواید بسیار زیادی برای محیط زیست می باشد از جمله:
- کاهش مصرف مصالح از قبیل سیمان، شن و ماسه، آب و میلگرد (هر kg پلاستیک جایگزین ۱۰۰ kg بتن می شود)
 - کاهش مصرف انرژی (در تولید، حمل و نقل و اجرا)
 - کاهش انتشار گازهای آلوده حاصل از تولید و حمل و نقل، به خصوص گاز CO₂، در حدود ۵۰٪
 - عدم وجود ضایعات (به علت قابل بازیافت بودن تمامی اجزا و تفکیک کامل اجزا هنگام تخریب)
- میزان کاهش مصرف انرژی و انتشار گازهای آلوده برابر با میزان کاهش مصالح مصرفی و در حدود ۵۰٪ می باشد.

و همچنین سبب ایجاد محیط اجتماعی بهتر به دلایل زیر می گردد.

- بهبود شرایط کار
- کاهش خطر در هنگام نصب
- کاهش زمان استفاده از بالابرها و جلوگیری از اختلال در محیط
- کاهش انتشار سر و صدا حین تولید، انتقال و نصب اجزا

۳.۵. از نظر اجرایی

- بالاتر بودن کیفیت در تهیه اتوماتیک واحد های پیش ساخته
- کمتر بودن کار در محل و به کارگیری نیرو های غیر متخصص
- نصب ساده و بسیار آسان
- نیاز به فضای کمتر برای انبار نمودن این نوع دال ها
- استفاده از وسایل بالابر ارزان تر و سبک

۴. آزمایشات انجام شده بر روی دال های مجوف بادکنکی

آزمایشات متعددی بر روی این گونه سقف ها انجام شده است که به بررسی مواردی مانند مقاومت و رفتار خمشی، مقاومت برشی و برش پانچ، مقاومت در برابر آتش سوزی، خزش، هدایت صوتی و گرمایی این گونه سقف ها در مقایسه با دال توپر می پردازد. لازم به ذکر است که این آزمایشات در دانشگاه های Technical University of Denmark در دانمارک و Technical University in Eindhoven و Technical University in Delft در هلند و Technical University of Darmstadt در آلمان و چندین موسسه علمی پژوهشی دیگر

انجام شده است. [۱]

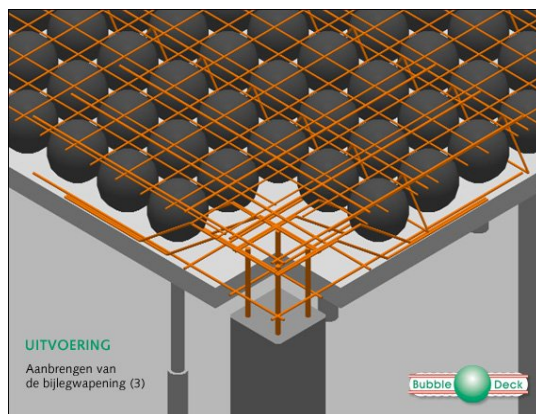


۴.۱. مقاومت و رفتار خمشی

با مقایسه ی دال مجوف بادکنکی و دال توپر چه به صورت تئوری و چه به صورت عملی مشخص می شود که برای ضخامت یکسان از دو سقف، مقاومت خمشی برابر می باشد ولی سختی دال مجوف بادکنکی اندکی کمتر است علاوه بر آن با در نظر گرفتن جرم یکسان برای دو سقف، صلبیت سقف بادکنکی سه برابر دال بتنی توپر می باشد.

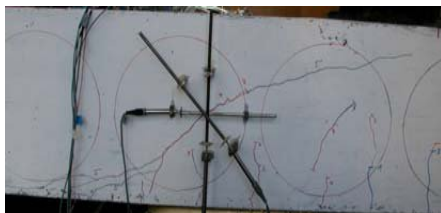
۴.۲. مقاومت برشی و برش پانچ

آزمایشات نشان می دهند که مقاومت برشی در نتیجه عملکرد مثبت توپ ها حتی از مقادیر پیش بینی شده نیز بیشتر می باشد. همچنین لازم به ذکر است که نواحی با برش زیاد نیازمند توجه ویژه ای می باشند برای مثال (مطابق شکل ۲) در اطراف ستون ها با حذف تعدادی از توپ ها ظرفیت برشی کامل حاصل می گردد. [۲]



شکل ۲ - حذف تعدادی از توپ ها در اطراف ستون به منظور ایجاد ظرفیت برشی کامل

با آزمایش نمودن دو نمونه ی ۲۳۰ و ۴۵۰ میلیمتری از دال مجوف بادکنکی و دال توپر هم ضخامت با آن مشخص شد که برش پانچ موضعی اتفاق نمی افتد و همچنین الگوی ترک در دال مجوف بادکنکی نیز خیلی شبیه به الگوی ترک در دال های توپر می باشد. (شکل ۳)



دال مجوف بادکنکی



دال توپر

شکل ۳ - نمایش الگوی ترک در دال های مجوف بادکنکی و توپر

۴.۳. مقاومت در برابر آتش سوزی

با انجام آزمایش بر روی دو نمونه از دال مجوف بادکنکی میزان مقاومت آنها در برابر آتش بررسی شد که نتایج آن در جدول ۱ آورده شده است. [۳]



جدول ۱- مشخصات دو نمونه و میزان مقاومت آن ها در برابر آتش سوزی

زمان مقاومت در برابر آتش سوزی (min)	کاور بتنی (mm)	ضخامت دال (mm)
۶۰	۲۰	۳۳۰
۱۲۰	۳۵	۲۳۰

۴.۴. خزش

با انجام آزمایشات متعدد مشخص شد که در خزش، دال مجوف بادکنکی و دال توپر رفتار مشابهی دارند.

۴.۵. هدایت صوتی و گرمایی

وجود فضای توخالی در المان های میانی این نوع دال ها، قابلیت عایق صوتی بودن آنها را در مقایسه با دال های توپر، دست کم به میزان ۱ dB افزایش می دهد و همچنین با جریان آب در داخل کابل هایی که بر روی شبکه میلگرد و بین توپ های پلاستیکی قرار داده می شود (مطابق شکل ۴) دمای مطلوبی حاصل می شود. [۴] و [۵]



شکل ۴ - نمایش کابل های جریان آب در دال های مجوف بادکنکی

۵. طراحی بر اساس آیین نامه های (DIN 1045) و (DIN 1045-1)

سقف های مجوف بادکنکی به مانند دال دو طرفه مجوف می باشند که در حالت کلی با استفاده از روش های طراحی مرسوم برای دال های صلب، مطابق با استاندارد متداول سازه های بتن آرمه (DIN 1045) یا (DIN 1045-1) طراحی می شود. در جدول ۲ مشخصات فنی چند نمونه از دال مجوف بادکنکی آورده شده است. [۶]

جدول ۲- مشخصات فنی دال های مجوف بادکنکی

قطر توپ (cm)	۱۸	۲۲/۵	۲۷	۳۱/۵	۳۶	۴۰/۵	۴۵
حداقل فاصله بین محور های توپ متوالی (cm)	۲۰	۲۵	۳۰	۳۵	۴۰	۴۵	۵۰
حداکثر تعداد توپ در یک متر مربع ($1/m^2$)	۲۵	۱۶	۱۱/۱۱	۸/۱۶	۶/۲۵	۴/۹۴	۴
حداقل ضخامت پیشنهاد شده دال (cm)	۲۳	۲۸	۳۴	۴۰	۴۵	۵۲	۵۸
میزان کاهش بار به ازای هر توپ (KN)	۰/۰۸	۰/۱۵	۰/۲۶	۰/۴۱	۰/۶۱	۰/۸۷	۱/۱۹
حداکثر بار کاهشی در هر متر مربع (KN/m^2)	۱/۹۱	۲/۳۹	۲/۸۶	۳/۳۴	۳/۸۲	۴/۲۹	۴/۷۷
ضریب صلبیت	۰/۸۸	۰/۸۷	۰/۸۷	۰/۸۸	۰/۸۷	۰/۸۸	۰/۸۸
ضریب برشی	۰/۶	۰/۶	۰/۶	۰/۶	۰/۶	۰/۶	۰/۶



۵.۱. مقاومت خمشی

در طراحی برای مقاومت خمشی باید ملاحظات زیر در نظر گرفته شود.

DIN 1045-1:

$$\mu_{sds} = \frac{1.96 m_{sd} D_{BD}}{f_{ck} d_B^3} \leq 0.2 \quad (1)$$

که در آن μ_{sds} لنگر خمشی نسبی در ناحیه توپ ها، m_{sd} لنگر خمشی ماکزیمم بر حسب مگانیوتن متر بر متر (MNm/m)، D_{BD} قطر توپ بر حسب متر (m)، d_B ضخامت دال به متر (m) و f_{ck} مشخصه مقاومت خمشی بر اساس DIN 1045-1 بر حسب مگانیوتن بر متر مربع می باشد.

DIN 1045:

$$m_s = \frac{1.17 m D_{BD}}{\beta_R d_B^3} \leq 0.2 \quad (2)$$

که در آن m_s لنگر خمشی نسبی در ناحیه توپ ها، m لنگر خمشی ماکزیمم تحت بار بر حسب مگانیوتن متر بر متر (MNm/m)، D_{BD} قطر توپ بر حسب متر (m)، d_B ضخامت دال به متر (m) و f_{ck} مقاومت محاسبه شده بر اساس DIN 1045 بر حسب مگانیوتن بر متر مربع می باشد.

۵.۲. مقاومت در برابر آتش

طبق آزمایشات انجام شده و با توجه به حداقل کاور بتنی و آرماتور گذاری در لایه پایینی دال بادکنکی، این نوع دال طبق جدول ۳ در برابر مدت زمان های آتش سوزی متفاوت، از خود مقاومت نشان می دهد. [۶]

باید یادآوری گردد که توپ های پلاستیکی از جنس پلی اتیلن با تراکم بالا (HDPE) بوده و نیز باید با حداقل مشخصات فنی کلاس مواد ساختمانی B2 در استاندارد DIN 1045-1 مطابقت داشته باشد. همچنین حداقل کاور بتنی در دال فوقانی باید 2.5 cm باشد. [۷]

جدول ۳- دو نوع دال بادکنکی از لحاظ مقاومت در برابر آتش

تنش فولاد $\sigma_s (MN/m^2)$	میزان کاربرد فولاد به درصد $\frac{\sigma_s (MN/m^2)}{286 (MN/m^2)} \times 100$	زمان مقاومت در برابر آتش سوزی (min)				
		۳۰	۶۰	۹۰	۱۲۰	۱۸۰
۱۹۰	۶۶	۱/۷cm	۱/۷cm	۱/۷cm	۱/۷cm	-
۲۸۶	۱۰۰	۱/۷cm	۲/۹cm	۳/۵cm	۴/۲cm	۵/۵cm

۵.۳. هدایت صوتی

طبق آزمایشات انجام شده و توصیه های ارائه شده توسط P-SAC/IV-065 نتایج زیر برای دو نوع دال مشخص به صورت جدول ۴ بدست می آید.

جدول ۴- دو نوع دال بادکنکی از لحاظ هدایت صوتی

قطر توپ (cm)	ضخامت دال (cm)	میزان صدای ارزیابی شده استاندارد (db)	میزان کاهش صوت ارزیابی شده (db)
۱۸	۲۳	۷۷	۵۵
۲۷	۳۴	۷۳	۵۷

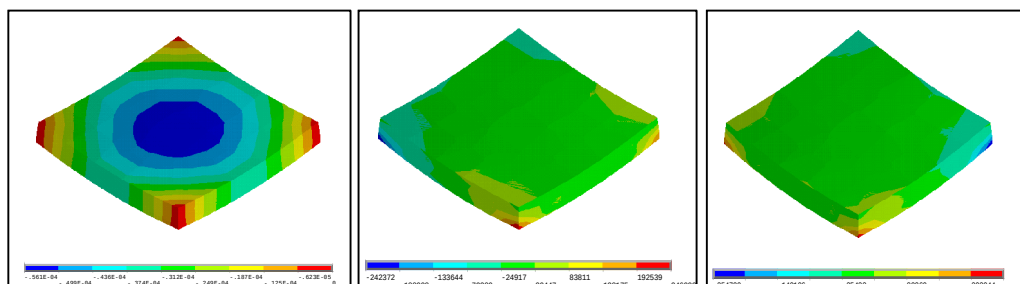


۶. مدل سازی با نرم افزار المان محدود

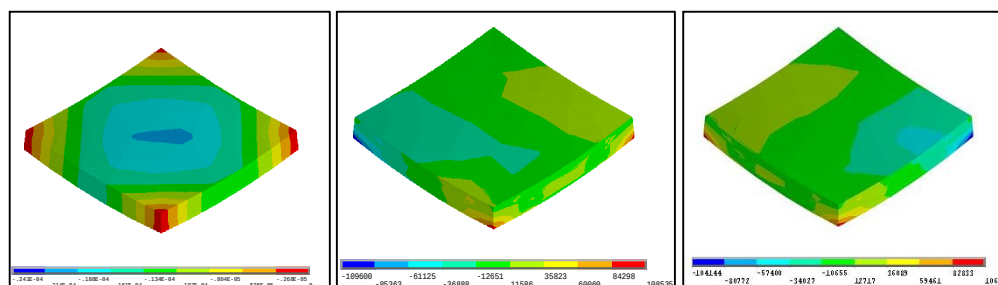
در این مرحله یک دال مجوف بادکنکی (به ابعاد مساوی $۲/۴\text{ m}$ ، ضخامت ۲۸ cm ، قطر توپ ها $۲۲/۵\text{ cm}$ و آرماتورهایی به قطر ۱۴ mm در قسمت تحتانی دال با فواصل متوالی ۱۱۷ mm و ۱۳۷ mm از یکدیگر و آرماتورهایی با قطر ۶ mm در قسمت فوقانی دال با فواصل متوالی ۱۵۵ mm و ۹۵ mm طبق مرجع [۴]) و یک دال توپر هم ضخامت با آن به کمک نرم افزار المان محدود ANSYS مدل سازی گردیده است. بار مرده ناشی از کف سازی ۲۵۰ kg/m^2 و بار زنده نیز برابر با ۲۰۰ kg/m^2 در نظر گرفته می شود. هر دو سقف را در شرایط یکسان تحت بارگذاری مشابه D+L تحت آنالیز استاتیکی مورد بررسی قرار می دهیم. لازم به ذکر است که در این مدل سازی از پنج نوع المان استفاده شده است. اولین المان، Solid65 می باشد که با هشت گره تعریف می شود و هر گره نیز دارای سه درجه آزادی است. این المان سه بعدی این توانایی را دارد که هم میلگرد را در خود (در سه راستای مختلف) و هم به صورت جداگانه مدل نماید که در این بررسی میلگرد ها به صورت جداگانه مدل شده اند. این المان به منظور مدل نمودن دال بتنی استفاده می شود که دارای ضریب پواسون $۰/۲$ و مدول الاستیسیته $۲\text{ E}۱۱\text{ Pa}$ و مقاومت فشاری ۳۰ MPa می باشد. المان دیگر Link8 می باشد که المانی سه بعدی و تک محوره در کشش و فشار و دو گره ای بوده که در هر گره سه درجه آزادی جابجایی در راستای X و Y و Z دارد. این المان برای مدل نمودن میلگرد ها به کار می رود که دارای ضریب پواسون $۰/۳$ و مدول الاستیسیته $۲/۱\text{ E}۱۱\text{ Pa}$ و مقاومت تسلیم ۴۲۰ MPa می باشد. المان سوم Shell43 می باشد که برای مدل نمودن لایه توپ پلاستیکی که دارای ضخامت $۱/۴\text{ mm}$ و ضریب پواسون $۰/۴۵$ و چگالی ۹۶۵ kg/m^3 است به کار می رود. المان چهارم المان Contact 174 و المان پنجم المان Contact 178 می باشند که به منظور تماس بین میلگرد و بتن و همچنین توپ و بتن تعریف می شوند. لازم به ذکر است که ضریب انتقال برش بین بتن و فولاد $۰/۶$ و بین توپ و بتن برابر $۰/۲۸$ می باشد.

۷. نتایج حاصل از مدل سازی

نتایج حاصل از این مدل سازی در شکل ۵ و ۶ به صورت شماتیک و در شکل ۷ مقایسه کمیتی بین این دو نوع سقف به صورت نموداری نشان داده شده است.



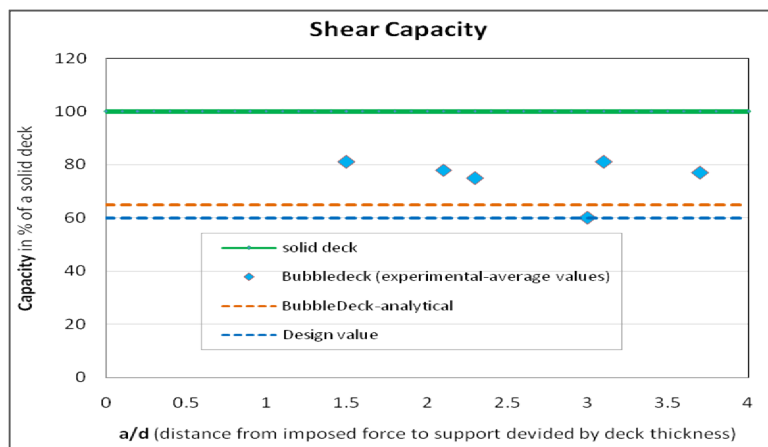
شکل ۵ - نتایج حاصل از مدل سازی دال مجوف بادکنکی (به ترتیب از راست به چپ تنش برشی در جهت yz و xy و تغییر مکان در جهت y)



شکل ۶ - نتایج حاصل از مدل سازی دال توپر (به ترتیب از راست به چپ تنش برشی در جهت yz و xy و تغییر مکان در جهت y)



نتایج حاصل از مدلسازی نشان می دهند که تفاوت چندانی از نظر تغییر مکان بین دال مجوف بادکنکی و دال توپر هم ضخامت با آن وجود ندارد ولی از نظر ظرفیت برشی مطابق با شکل ۷ تفاوت هایی بین آنها وجود دارد.



شکل ۷- نمودار میزان ظرفیت برشی دال مجوف نسبت به دال توپر برحسب نسبت فاصله از بار وارده به ضخامت دال

۸. نتیجه گیری

- (۱) دال مجوف بادکنکی موجب توزیع بهتر و بهینه تر نیروها نسبت به دیگر انواع دال های مجوف می گردد.
- (۲) تجربیات عملی، تاثیر مثبت توپ ها را در فرآیند گیرش بتن نشان می دهد. (ایفای نقش افزودنی پلاستیکی بتن توسط توپ پلاستیکی)
- (۳) می توان دال مجوف بادکنکی را به صورت پیش تنیده نیز اجرا نمود.
- (۴) تمامی تجربیات و آزمایشات مهندسی تأیید می کنند که دال مجوف بادکنکی از هر جهت مانند یک دال صلب و یکپارچه عمل نموده و بنابراین از تمامی قوانین و قواعد دال صلب یکپارچه - ولی با جرم کمتر - پیروی کرده و همچنین منجر به صرفه جویی های قابل توجهی خواهد شد.
- (۵) از نظر تجربی و آزمایشگاهی ظرفیت برشی دال مجوف بادکنکی ۷۲ تا ۹۱٪ ظرفیت برشی دال توپر هم ارتفاع با آن می باشد ولی در محاسبات و طراحی با اعمال ضریب ۰/۶ در ظرفیت برشی دال توپر، ظرفیت برشی دال مجوف بادکنکی بدست می آید.

۹. منابع و مراجع

- 1) Bubble Deck, Two-Way Hollow Deck, Guðmundur Björnson, September 2003.
- 2) Investigations On The Shear Capacity Of Biaxial Hollow Slabs , Markus Aldejohnn, Martina Schnellenbach-Held, Test Results and Evaluation, Darmstadt Concrete 18 ,(2003).
- 3) German Test Certificate No. P-SAC02/IV-065 , Fire Resistance Rating F30 to F180 ,June 2002.
- 4) Bubble Deck Voided Flat ,Slab Solutions Technical Manual & Documents ,June 2008.
- 5) Bubble Deck Acoustic, Tests and Reports, White Lodge, Wellington Road, March 2006.
- 6) The Two Way Hollow Deck, The Way to New Solutions, Bubble Deck Design.
- (۷) علی خیرالدین، جواد حداد، سعید فامیلی "استفاده از سقف های بادکنکی جهت سبک سازی ساختمان ها در برابر زلزله"، اولین همایش بین المللی زلزله و سبک سازی ساختمان، دانشگاه قم، مهر ۸۴
- (۸) علی خیرالدین، جواد حداد "دال های مجوف بادکنکی جایگزینی مناسب برای دال های توپر"، مجله راه و ساختمان، شماره ۲۰، بهار ۸۴