



سختی و صلبیت سقف های مجوف (وافل) و کاهش بار مرده در مقابل دال های دوطرفه

حیدرعلی نیری^۱، مرتضی ایرانی پرست^۲

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، زلزله، دانشگاه آزاد اسلامی واحد بوشهر، بوشهر، ایران

Vahid.nayeri@gmail.com

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، زلزله، دانشگاه آزاد اسلامی واحد بوشهر، بوشهر، ایران

Morteza_iraniparast@yahoo.com

چکیده

سقف های مجوف (وافل) شامل تعدادی شناژ (تیرچه) عمود برهم، بصورت مقطع T شکل و دارای رفتاری دوطرفه می باشد. در این گونه سقف ها با کاهش ضخامت دال و اضافه کردن شناژهای متعدد نسبت به دال بتنی دوطرفه، باعث کاهش بار مرده سقف و همچنین دارا بودن سختی مناسب در مقابل بارهای جانبی و ثقلی می باشد. تعدادی مدل وافل و دال در نظر گرفته می شود. به کمک نرم افزار کامپیوتری، تغییر شکل در برابر بار متمرکز و شرایط تکیه گاهی معین بدست می آید. با آنالیز مدل ها و بدست آوردن اطلاعات لازم، نمودارهای مختلف را رسم کرده. سپس به مقایسه بین مدل ها می پردازیم. در نتیجه مدل وافلی که دارای AS یکسان با دال دوطرفه می باشد، دارای مقاومت نهایی بیشتری است.

واژه های کلیدی: سقف، وافل، صلبیت، سختی، کاهش بار مرده

۱. مقدمه

دال های وافل معمولاً شامل ترکیب یک صفحه ی رویه تخت (کف)، به اضافه مجموعه ی از تیرچه های موازی با فاصله ی برابر و به صورت شبکه، که به یکی از دو شکل متعامد یا ترکیب مورب با فصل مشترک یکپارچه اجرا می گردد. (شکل ۱) دال های وافل به عنوان دال مسطح تیرچه دار دو طرفه، در سازه های نوین به منظور کاهش وزن بار مرده و حمل بار جانبی بکار برده می شود. اطلاعات در زمینه مقاومت و رفتار دال های وافل بتن مسطح نسبتاً محدود می باشد. تئوری صفحات متعامد به منظور مصالح الاستیک ایده ال از جمله فولاد، بکار برده شدند در طراحی دال های وافل بتن مسلح نیز استفاده شده اند.

این مقاله به دو بخش تقسیم شده است. بخش اول شامل تئوری و آنالیز کامپیوتری برای بدست آوردن خیز مرکز دال بتنی (وافلی یا تخت) می باشد، که با استفاده از این بخش و اثبات صلبیت و سختی این گونه سقف ها در بخش دوم به بررسی (آنالیز و طراحی) این گونه دال ها و مقایسه با دال های بتنی تخت، برای بارهای متعارف ساختمانی پرداخته می شود.

۲. بررسی تئوری

برای آنالیز دال های وافل از تئوری کلاسیک صفحات ایزوتروپیک استفاده می شود (هاشم عبدالوهاب و محمد خلیل) در کل برای استفاده از این تئوری فرض می شود (۱) به تعداد کافی در هر دو جهت تیرچه موجود می باشد (در حدود ۵ تیرچه به بالا) (۲) صفحه خنثی در هر جهت با مرکز تمامی مقاطع دال وافل منطبق است.

با استفاده از معادله دیفرانسیلی (معادله ۱) تیموشنکو و ونوفسکی - کرینگر ۱۹۵۹، کاسنس و پاما (۱۹۷۵) مقدار خیز، لنگر و برش دال در مقابل بار گسترده و شرایط تکیه گاهی معین بدست می آید.

$$D_x \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2H \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + D_y \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} = P(x, y) \quad (1)$$

که D_x و D_y برابر صلبیت خمشی، $2H$ برابر کل صلبیت پیچشی مساوی با مجموع صلبیت پیچشی در جهت x و y ، D_{xy} و D_{yx} برابر صلبیت مفصلی می باشد.

$$2H = D_{xy} + D_{yx} + D_1 + D_2 \quad (2)$$

D_1 و D_2 بیان‌کننده سهم خمش در پیچش کف می‌باشد. هم‌چنین مقدار $2H$ را نیز به صورت (معادله ۳) نیز می‌نویسند. (بارس و ماسونت ۱۹۶۶)



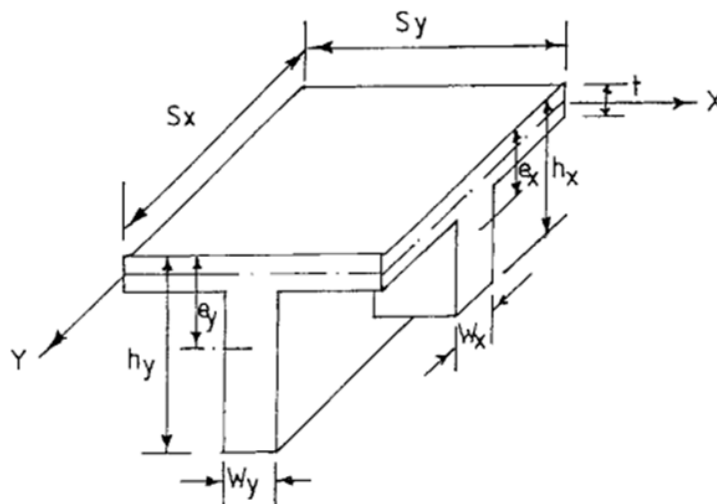
شکل (۱): سقف دال مجوف (وافل)

$$2H = 2\alpha \sqrt{D_x D_y} \quad (3)$$

بطوریکه

$$\alpha = \frac{D_{xy} + D_{yx} + D_1 + D_2}{2\sqrt{D_x D_y}} \quad (4)$$

مقدار H (صلبیت) دارای یک حد بالا برابر $H = D_x = D_y$ و یک حد پایین برای شبکه‌ای با اجزای بدون صلبیت پیچشی $H = 0$ می‌باشد. بر اساس شکل شماره ۲ پاما ۱۹۷۵، باراس و ماسونت ۱۹۶۶ معادله شماره ۵ را پیشنهاد دادند.



شکل (۲): مقطع دال وافل



$$D_x = \frac{EI_{sx}}{S_x}, D_y = \frac{EI_{sy}}{S_y} \quad (5)$$

I_{sx} و I_{sy} ممان اینرسی حول محور خنثی در جهت x و y ، S_x و S_y فاصله بین تیرچه‌ها. همچنین کاسنس و پاما ۱۹۷۵ معادله ۶ را پیشنهاد دادند.

$$2H = B_{xy} + B_{yx} + \frac{Et^3}{6(1-\eta^2)} + \frac{\eta E W_x W_y}{2 S_x S_y} (h_y - t) \left[(h_y - t) \left\{ (h_y - t) - (e_x - e_y) \right\} + \frac{(h_y - t)^2}{3} \right] \quad (6)$$

B_{yx} و B_{xy} صلبیت تکی تیرچه‌ها در جهت طولی و عرضی و ترم سوم معادله ۶ برابر صلبیت پیچشی کلی دال می‌باشد.

$$B_{xy} = \frac{GKW_x^3 (h_x - t)}{S_x} \quad (7)$$

$$B_{yx} = \frac{GKW_y^3 (h_y - t)}{S_y} \quad (8)$$

۳. مدل سازی

با استفاده از نرم افزار Etabs ورژن ۹ مدل ساخته شده، سازه ای یک طبقه با ارتفاع ۴، طول و عرض ۶ متر دارای ۲ محور در هر دو جهت عمود بر هم که ۴ المان column به عنوان ستون‌ها و ۴ المان Beam به عنوان تیرهای جانبی می‌باشند، مدل می‌شود. در قسمت wizard نرم افزار با انتخاب Waffle Slab مقدار Overhangs را صفر و همچنین کتیبه سر ستونی حذف می‌شود. با اعمال شرایط تکیه گاهی Fixed و برای جلوگیری از تغییر شکل ستون در مقابل بارهای ثقلی و جانبی در تمامی مدل‌ها از المان ستون با مقطع مربع و به ضخامت ۱۲۰ سانتیمتر استفاده شده. مقدار ضخامت دال مسطح رویه نیز به اندازه ۵ سانتیمتر می‌باشد که به صورت دو طرفه انتخاب شده است. (شکل ۳)

اعمال بار جانبی به سازه از استاندارد ۲۸۰۰ استفاده شده، از بخش ۲-۳-۶ زمان تناوب اصلی نوسان مقدار T خیلی کوچک بدست می‌آید، در نتیجه ضریب C (معادله ۹) برابر ۰/۱۱ می‌شود.

$$C = \frac{ABI}{R} \quad (9)$$

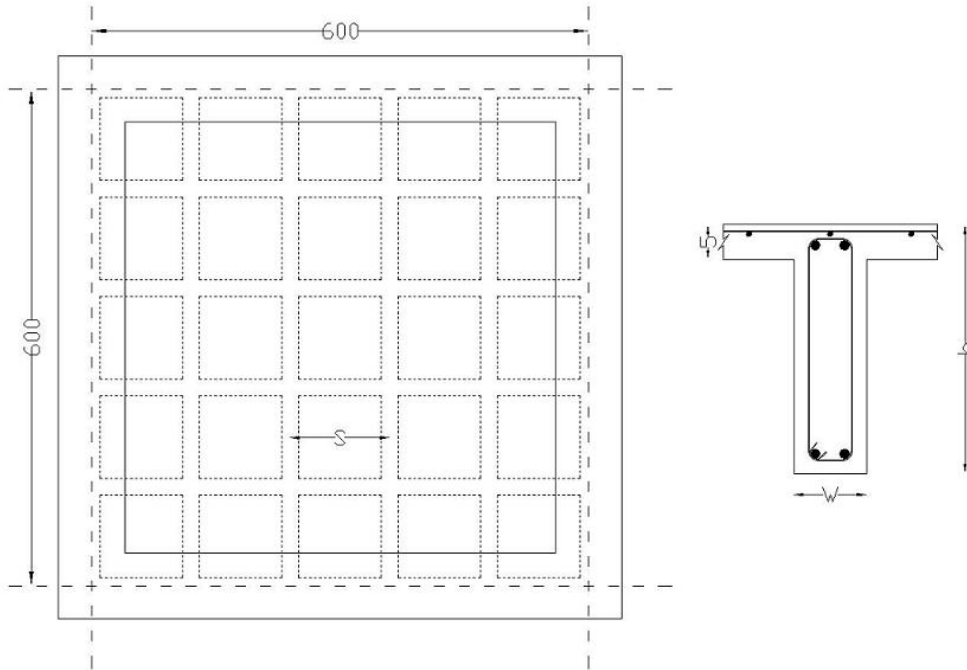
برای افزایش اثر زلزله مقدار C برای نرم افزار ۰/۲۵ تعریف شد.

برای تعیین مقدار خیز از چند دال نمونه (جدول ۱) استفاده می‌شود. آیین نامه ACI 318-05 2003 و اعمال ضریب بارهای ۱/۲ بار مرده و ۱/۶ بار زنده برای آنالیز و طراحی استفاده می‌شود. بار زنده مرده ۲۰۰ کیلوگرم بر متر مربع برای تعیین ضخامت و تعداد تیرچه‌های این دال‌ها استفاده گردید این بار برابر با بار متعادل برای ساختمان‌های متعارف می‌باشد. بدین صورت که دال‌های که قدرت تحمل این بار را داشته باشند و دچار شکست برشی در مقابل این بار نشوند به عنوان دال آزمایشی انتخاب می‌شوند.

اقدام به حذف بارهای مرده و زنده روی دال کرده و بار متمرکز در قسمت مرکزی دال وارد می‌شود. بدین صورت که بار از ۵۰۰ کیلوگرم شروع شده و تا جای که مدل دچار شکست برشی نشود ادامه پیدا می‌کند. در هر بار بارگذاری مقدار خیز مرکز دال اندازه‌گیری و ثبت می‌شود. (جدول ۲).

جدول (۱): مدل سازی برای اعمال بار متمرکز

مدل	تعداد پانل	تعداد تیرچه	فاصله تیرچه‌ها (متر) S	ارتفاع مقطع (سانتیمتر) h	عرض مقطع (سانتیمتر) w
S1	۴	۳	۱/۵۰	۳۰	۱۵
S2	۶	۵	۱	۲۵	۱۷/۵۰
S3	۶	۵	۱	۳۰	۱۵
S4	۶	۵	۱	۳۵	۱۵
S5	۸	۷	۰/۷۵	۳۵	۲۰



شکل (۳): نقشه و برش دال مجوف

جدول (۲): بار متمرکز وارده و تغییر شکل مرکز دال بر حسب میلی‌متر

بار (تن)	۰/۵	۱	۱/۵	۲	۲/۵	۳	۳/۵	۴	۵	۶	۷	۸	۹
مدل S1	۲/۲	۲/۴	۲/۶	۲/۸	۳	۳/۳	۳/۵	۳/۷	۴/۲	۴/۶			
مدل S2	۱/۶	۱/۹	۲/۱	۲/۳	۲/۵	۲/۷	۳	۳/۲					
مدل S3	۴/۷	۵	۵/۳	۵/۷									
مدل S4	۳/۸	۴	۴/۱	۴/۳	۴/۵	۴/۶	۴/۷	۵	۵/۳	۵/۷			
مدل S5	۳/۹	۴	۴/۱	۴/۳	۴/۴	۴/۵	۴/۶	۴/۷	۴/۹	۵/۱	۵/۳	۵/۶	۵/۸

۴. بررسی نتایج مدل‌ها

اثر ارتفاع تیرچه‌ها

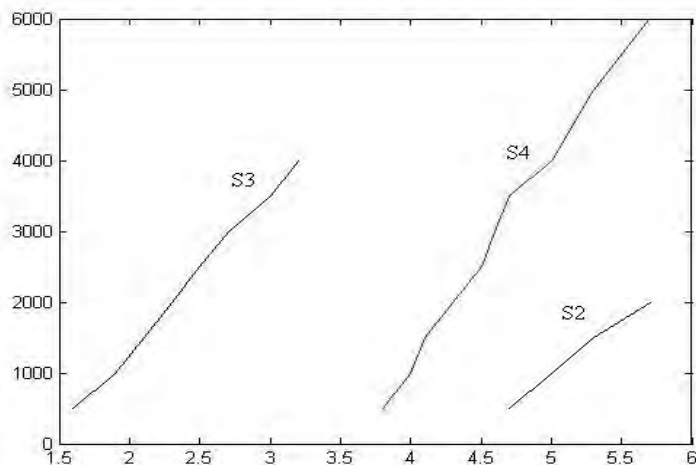
در مقایسه بین مدل‌های که دارای تعداد تیرچه‌های مساوی هستند (S2, S3, S4) تعداد ۵ تیرچه به فاصله ۱ متر از یکدیگر مشاهده می‌شود. (شکل ۴) هرچه ارتفاع تیرچه‌ها بیشتر شود صلبیت مقطع در مقابل بار وارد شده افزایش می‌یابد. همچنین مقطعی که کمترین ارتفاع مقطع را دارد S2 تغییر شکل بیشتری (کمترین صلبیت) از خود نشان می‌دهد.

اثر تعداد تیرچه‌ها

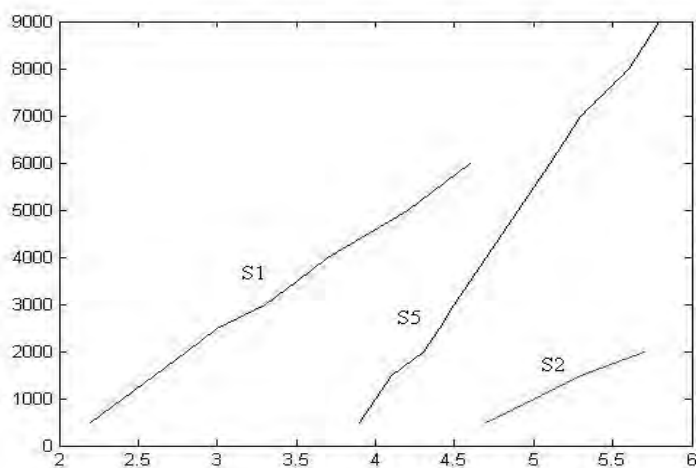
مقایسه بین مدل‌های S1, S2, S5 شکل ۵ نمایانگر این فرضیه است که هرچه تعداد تیرچه‌ها افزایش یابد (۱) صلبیت دال در مقابل افزایش بار، افزایش می‌یابد (۲) سرعت رشد تغییر شکل کاهش یافته (۳) اما افزایش حجم بتن ریزی و در نتیجه افزایش وزن بار مرده را مشاهده شده.

اثر عرض مقاطع در مقابل بار نهایی (بار موجب شکست برشی)

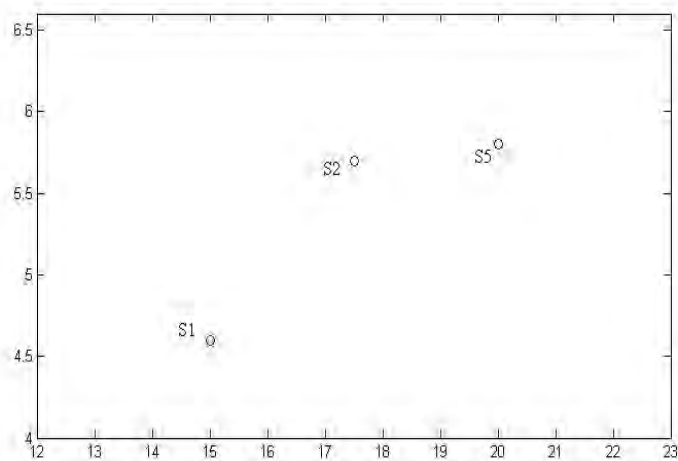
در مقایسه بین مدل‌های S1, S2, S5 برای بار نهایی قبل از شکست برشی مشاهده می‌شود (شکل ۵) هرچه عرض مقطع افزایش یابد افزایش صلبیت در مقابل شکست برشی افزایش می‌یابد.



شکل (۴) اثر ارتفاع تیرچه برای تعداد تیرچه مساوی



شکل (۴) اثر تعداد تیرچه



شکل (۵): اثر عرض مقطع در مقابل بار نهایی



۵. کاهش بار مرده دال مجوف

با استفاده از مدل های ساخته شده برای محاسبه صلبیت دال وافل ، چند مدل دیگر ۴ تا ۱۰ متر ساخته می شود (جدول ۳) برای مقایسه بین مدل های دال مجوف و دال دو طرفه ساده (تخت) ساخته می شود . تعدادی دال دو طرفه (جدول ۴) با ابعاد ۴ تا ۱۰ متر نیز آنالیز و طراحی می شود. با اعمال بار های مرده و زنده ۲۰۰ کیلوگرم بر مترمربع و اعمال شرایط تکیه گاهی Fixed و در نظر گرفتن Rigid Floor Diaphragm اقدام به آنالیز و طراحی مدل های وافل می شود. (جدول ۵)

جدول (۳): مدل های وافل برای اعمال بار گسترده

مدل	ابعاد (متر)	تعداد پانل	تعداد تیرچه	تیرهای جانبی	ارتفاع مقطع (Cm)	عرض مقطع (Cm)	حجم بتن مقطع (متر مکعب)
K4-1	۴ در ۴	۴	۳	۸۰ در ۸۰	۲۵	۱۵	۱/۲۵
K6-1	۶ در ۶	۴	۳	۸۰ در ۸۰	۳۵	۱۵	۳/۰۱۵
K6-2	۶ در ۶	۵	۴	۸۰ در ۸۰	۳۰	۱۵	۳
K6-3	۶ در ۶	۶	۵	۸۰ در ۸۰	۲۵	۲۰	۳/۲
K6-4	۶ در ۶	۶	۵	۸۰ در ۸۰	۳۰	۱۵	۳/۱۱۲۵
K6-5	۶ در ۶	۶	۵	۸۰ در ۸۰	۳۵	۱۵	۳/۳۷۵
K6-6	۶ در ۶	۸	۷	۸۰ در ۸۰	۳۵	۱۵	۳/۳۷۵
K8-1	۸ در ۸	۵	۴	۸۰ در ۹۰	۳۵	۲۰	۶/۰۸
K8-2	۸ در ۸	۵	۴	۸۰ در ۹۰	۴۰	۱۷/۵۰	۶/۱۴
K8-3	۸ در ۸	۶	۵	۸۰ در ۹۰	۳۵	۱۷/۵۰	۶/۰۸۷۵
K8-4	۸ در ۸	۶	۵	۸۰ در ۹۰	۴۰	۱۵	۶/۰۸۷۵
K8-5	۸ در ۸	۸	۷	۸۰ در ۹۰	۳۰	۲۰	۶/۳۵
K8-6	۸ در ۸	۸	۷	۸۰ در ۹۰	۳۵	۱۷/۵۰	۶/۵۰۷۵
K8-7	۸ در ۸	۸	۷	۸۰ در ۹۰	۴۰	۱۵	۶/۵۰۷۵
K10-1	۱۰ در ۱۰	۶	۵	۸۰ در ۹۰	۴۰	۲۰	۱۰/۲۵
K10-2	۱۰ در ۱۰	۸	۷	۸۰ در ۹۰	۴۰	۱۷/۵۰	۱۰/۵۷
K10-3	۱۰ در ۱۰	۱۰	۹	۸۰ در ۹۰	۴۰	۱۷/۵۰	۱۱/۰۶

از آرمانتور نمره ۶ به فاصله هر ۲۵ سانتیمتر به عنوان میلگرد حرارتی استفاده می شود.

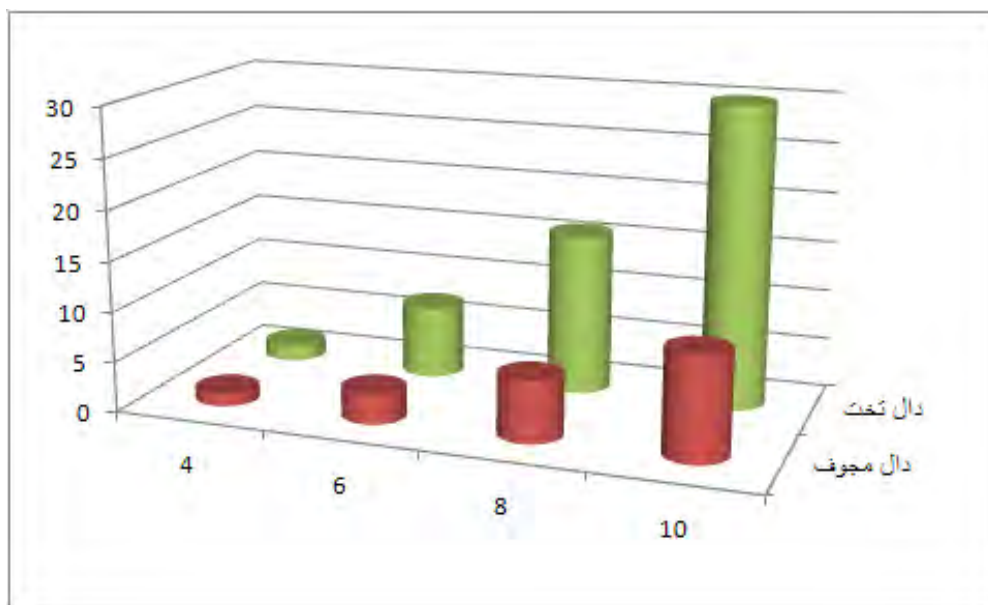
جدول (۴): مدل های دال تخت برای اعمال بار گسترده

مدل	ابعاد (متر)	ضخامت (سانتیمتر)	میلگرد	حجم بتن (متر مکعب)	وزن فولاد (کیلوگرم)
SS-1	۴	۱۰	۸@۱۷/۵۰	۱/۶	۱۴۴/۲۳
SS-2	۶	۲۰	۱۰@۱۷/۵۰	۷/۲	۵۰۷/۰۶
SS-3	۸	۲۵	۱۲@۲۵	۱۶	۹۰۸/۶۶
SS-4	۱۰	۳۰	۱۲@۲۰	۳۰	۱۷۷۴/۷۳

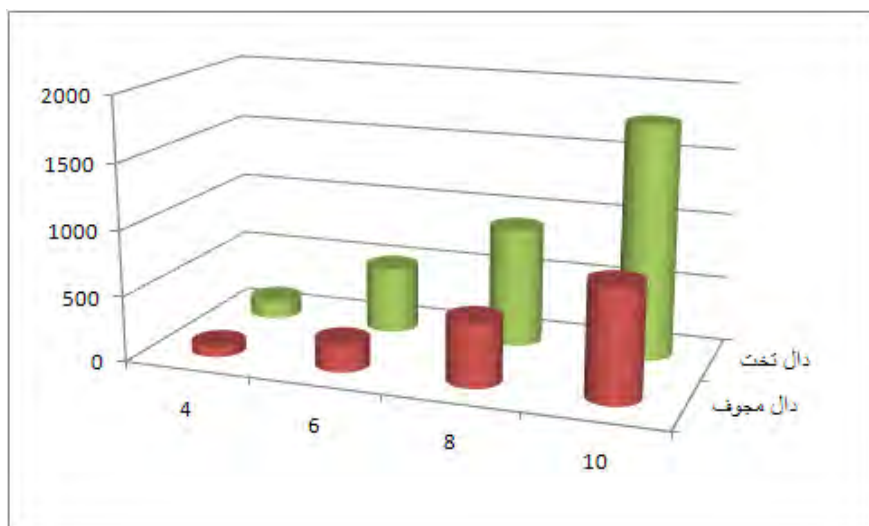
جدول (۵): نتایج بدست آمده از آنالیز و طراحی دال‌های مجوف

مدل	max As پایین	Max As بالا	میلگرد پایین دو عدد	میلگرد بالا دو عدد	ρ پایین	ρ بالا	وزن فولاد کیلوگرم
K4-1	۰/۶۳	۱/۱۶	۱۰	۱۰	۰/۰۰۴۲	۰/۰۰۴۲	۷۹/۲۵
K6-1	۱/۴	۲/۱۴	۱۲	۱۲	۰/۰۰۴۳	۰/۰۰۴۳	۱۷۲/۹۹
K6-2	۱/۵	۲/۰۷	۱۲	۱۲	۰/۰۰۰۵	۰/۰۰۰۵	۲۱۵/۵۷
K6-3	۱/۵	۲/۳۶	۱۲	۱۲	۰/۰۰۴۵	۰/۰۰۴۵	۲۵۸/۱۸
K6-4	۱/۲۷	۱/۹۵	۱۲	۱۲	۰/۰۰۰۵	۰/۰۰۰۵	۲۵۸/۱۸
K6-5	۱/۰۹	۱/۶۸	۱۲	۱۲	۰/۰۰۴۳	۰/۰۰۴۳	۲۵۸/۱۸
K6-6	۰/۸	۱/۶۵	۱۲	۱۲	۰/۰۰۴۳	۰/۰۰۴۳	۳۴۳/۳۷
K8-1	۲/۴۶	۴/۱۷	۱۴	۱۸	۰/۰۰۴۴	۰/۰۰۷۳	۴۹۰/۵۴
K8-2	۲/۱۸	۳/۶۱	۱۲	۱۶	۰/۰۰۳۲	۰/۰۰۵۷	۳۹۵/۸۹
K8-3	۱/۹	۳/۸۸	۱۲	۱۶	۰/۰۰۳۷	۰/۰۰۶۶	۴۷۴/۷۶
K8-4	۱/۹۱	۳/۳۷	۱۲	۱۶	۰/۰۰۳۸	۰/۰۰۶۷	۴۷۴/۷۶
K8-5	۱/۸۶	۳/۸	۱۲	۱۶	۰/۰۰۳۸	۰/۰۰۶۷	۶۳۲/۵۲
K8-6	۱/۹	۳/۲۴	۱۲	۱۶	۰/۰۰۳۷	۰/۰۰۶۶	۶۳۲/۵۲
K8-7	۱/۸۵	۲/۷۱	۱۲	۱۴	۰/۰۰۳۸	۰/۰۰۵۱	۵۴۹/۷۰
K10-1	۳/۱۵	۶/۶۱	۱۴	۲۰	۰/۰۰۳۸	۰/۰۰۷۹	۸۶۰/۱۴
K10-2	۲/۵	۵/۲	۱۴	۱۸	۰/۰۰۴۴	۰/۰۰۷۳	۱۰۲۲/۸۲
K10-3	۲/۲۳	۴/۴۲	۱۲	۱۸	۰/۰۰۳۲	۰/۰۰۷۳	۱۱۶۳/۸۱

به کمک محاسبه درصد کاهش حجم بتن دال مجوف نسبت به دال تخت (شکل ۷) و در نظر گرفتن بیشترین درصد اختلاف برای هر کدام از ابعاد، درصد کاهش میلگرد برای هر کدام از دو نوع دال بدست می‌آید (شکل ۸) با نگاهی به جدول ۷ مشاهده می‌شود که هرچه ابعاد بزرگتر شود درصد کاهش حجم افزایش می‌یابد این درصد برای دهانه ۴ متر نسبت به ۱۰ متر حدود ۳ برابر افزایش نشان داده است. در صورت ندیده گرفتن دهانه ۴ در ۴ در شکل شماره ۹ برای حداکثر درصد کاهش وزن فولاد می‌توان مشاهده کرد که با افزایش ابعاد بر خلاف کاهش حجم بتن شاهد افزایش درصد فولاد و در نتیجه افزایش فولاد مصرفی می‌باشد.



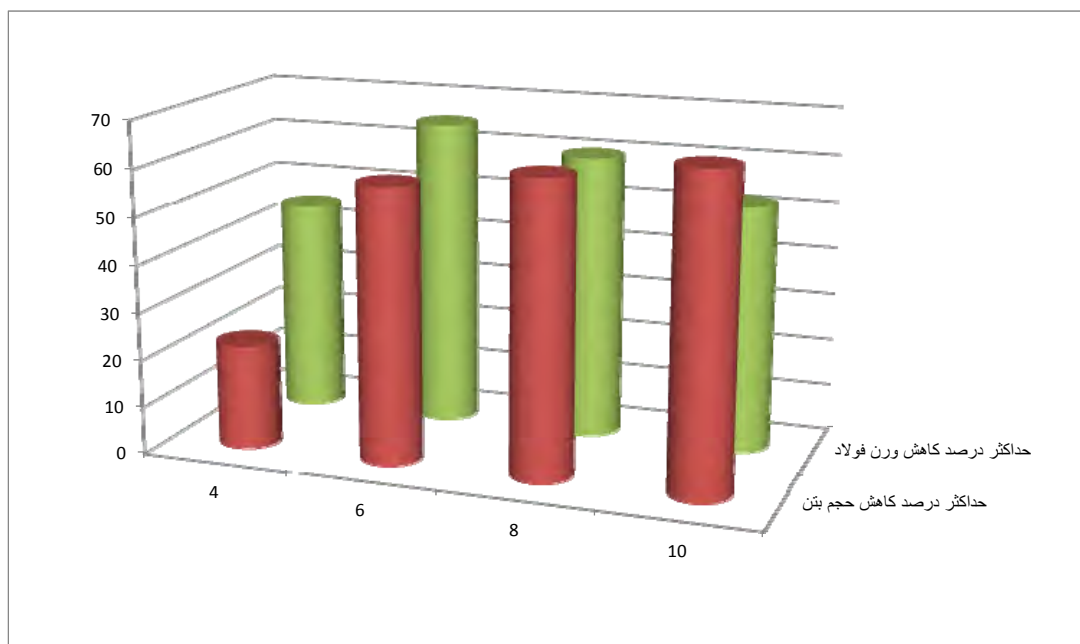
شکل (۷): مقایسه حجم بتن ریزی برای ابعاد مختلف دال‌های مجوف و تخت



شکل (۷): مقایسه وزن فولاد برای ابعاد مختلف دال های مجوف و تخت

جدول (۶): درصد کاهش حجم بتن ریزی و وزن میلگرد در نمونه هایی با حجم کمتر بتن ریزی برای ابعاد مختلف

ابعاد مدل (متر)	شماره مدل دال مجوف	حجم بتن (متر مکعب)			وزن فولاد (متر مکعب)		
		دال مجوف	دال تخت	درصد کاهش	دال مجوف	دال تخت	درصد کاهش
۴ در ۴	K4-1	۱/۲۵	۱/۶	%۲۲	۸۰	۱۴۵	%۴۵
۶ در ۶	K6-2	۳	۷/۲	%۵۸	۲۱۶	۵۰۸	%۵۷
۸ در ۸	K8-1	۶/۰۸	۱۶	%۶۲	۴۹۱	۹۰۹	%۴۶
۱۰ در ۱۰	K10-1	۱۰/۲۵	۳۰	%۶۶	۸۶۰	۱۷۷۵	%۵۲



شکل (۷): مقایسه وزن فولاد برای ابعاد مختلف دال های مجوف و تخت



۶. نتیجه گیری

به طور خلاصه و با استفاده از دال‌های بتنی مجوف علاوه بر صلبیت قابل قبول این دال‌ها شاهد کاهش قابل ملاحظه حجم بتن ریزی و وزن فولاد مصرفی می‌باشیم. در دو حجم برابر بتن ریزی برای دال‌های مجوف مشاهده می‌شود دالی که دارای تعداد تیرچه کمتری می‌باشد، مقدار فولاد کمتری نیز مورد استفاده قرار گرفته است.

در مقایسه بین دال‌های مجوف و تخت به این نکته باید اشاره شود که قالب بندی سقف‌های وافل به دلیل داشتن خانه‌های لانه زنبوری به سطح بیشتری نیازمند است که از نظر هزینه و سرعت اجرا قابل مشاهده و بحث می‌باشد. می‌توان دال دوطرفه مجوف را بصورت پیش ساخته نیز ساخت زیرا وزن واحد سطح آن بسیار کاهش یافته است، بنابراین با استفاده از جرثقیل و اقدامات اولیه برای کارهای ساخت و ساز مورد استفاده قرار گیرد. در آخر در نتیجه مدل وافلی که دارای AS یکسان با دال دوطرفه می‌باشد، دارای مقاومت نهایی بیشتری است.

۸. مراجع

- [1] hashim M.S. Abdul-Wahab and Mohammad H.Khalil Journal of Strucural Engineering Vol 126 No 2 Feb 2000 ASCE , ISSN 0933-9445
- [2] Timoshenko, S., And Woinosky-Krieger, S. (1959) Theory of plate and shells, 2nd Ed., McGraw-hill, New York , 364-377.
- [3] Abdul-Wahab, H. M. S. (1967) " the rigidity of perforated plate and slabs," PhD thesis, University of Sheffield, Sheffield, England.
- [4] Bares, R. and massinnet, C. (1966) . Analysis of beam structure." ACI J. 83(6), 909-915

[۵] آیین نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله استاندارد ۸۴-۲۸۰۰، ویرایش سوم ۱۳۸۴

[۶] طراحی ساختمان‌های بتنی با استفاده از آیین نامه بتن آمریکا، شاپور طاحونی، ۱۳۷۹