عملکرد دالهای دو طرفه بتنی مسلح به ورقهای فولادی سوراخدار

علیرضا خالو — استاد دانشکدهٔ مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف
مرتضی رئیسی دهکردی — کارشناس ارشد سازه، دانشگاه صنعتی شریف

چکیده

با هدف بررسی رفتار دالهای مسلح بهورقهای فولادی سوراخدار در خمش دو طرفه، نمونههایی از دالهای بتنی مسلح به ورقهای فولادی سوراخدار و نمونههایی از دالهای مسلح بهشبکه میلگردهای (با درصد حجمی تقریباً مساوی) ساخته شده و تا شکست، تحت آزمایش قرار گرفتهاند. نتایج حاصل از آزمایشها نشان میدهد که دالهای مسلح بهورقهای سوراخدار در مقایسه با سیستم معمولی تسلیح دالها، از مقاومت ترک خوردگی، نرمی، قابلیت جذب انرژی و مقاومت نهایی بالاتری برخوردار میباشند. امکان انتقال نیرو از فولاد به بتن و برعکس میتواند استفاده عمومی از این روش و کاربرد ورقهای سوراخدار ساخته شده از مواد کامپوزیت با مقاومت کششی مناسب را فراهم آورد.

کلمات کلیدی: دالهای دو طرفه، بتن مسلح، ورقهای سوراخدار، آزمایش

Performance of Two-way Concrete Slabs Reinforced with Perforated Steel Plates

A. R. Khaloo and M. Raiisi Dehkordi
Structural Engineering, Sharif Univ. of Technology

Abstract

In this study, perforated steel plates are proposed to reinforce concrete slabs. Three slab specimens reinforced with perforated steel plates and three slab specimens reinforced conventionally were cast and tested to failure. Test results and analysis show that slabs reinforced with perforated plates provide higher cracking strength, ductility, energy absorption capacity and ultimate strength than slabs reinforced with conventional reinforcement. Improve in force transfer between steel and concrete can facilitate the use of perforated plates in various applications, specially those made of composite materials with high tensile strength.

Keywords: Two-way slabs, Reinforced concrete, Perforated plates, test

۱- مقدمه

روش پیشنهادی جهت مسلح کردن دالهای بتن آرمه، استفاده از ورقهای سوراخدار می‌باشد. بهدلیل واقع شدن بتن در درون سوراخهای ورق، انتقال نیرو بین بتن و فولاد فراهم می‌شود و قطعه نرمی کافی پیدا می‌نماید.

ورقهای سوراخدار به واسطهٔ سختی محوری خود بیشتر از شبکه میلگردها قادرند که بتن موجود در سوراخها را محصور نمایند. این محصور کنندگی می‌تواند از وقوع ترکهای زودرس و گسترش سریع ترکها به طرف ناحیه فشاری بتن جلوگیری کند. رفتار نرم و قابلیت جذب انرژی بالا از ملزومات مهم، جهت کاربرد اعضای بتن مسلح در سازههای تحت بارهای لرزهای یا دینامیکی است [۱و۲]. با توجه به اینکه استفاده از ورقهای سوراخدار در دالهای بتنی برای اولین بار مطرح می‌شود، تعدادی نمونه ساخته شد و تحت آزمایش قرار گرفت تا خصوصیات این روش بررسی شود. برای بهدست آوردن اطلاعات مقایسهای قابل اطمینان، نمونههایی مشابه و مسلح به میلگردهای فولادی نیز مورد بررسی قرار گرفت.

۲- برنامهٔ آزمایشها

با توجه بهحداقل مقدار نسبت طول بهضخامت دهانه موردنیاز در دالها و با توجه به ابعاد دالهای مسلح به میلگردهای فولادی آزمایش شده در سایر تحقیقات [۳، ۴، ۵ و ۶] ورقهائی فولادی به ابعاد ۱۲۵cm*۱۲۵cm و ضخامت ۱/۲۵mm تهیه شد. برای ایجاد سوراخها و بهمنظور جلوگیری از بروز ترک در لبههای سوراخها مته ظریفی بهکار گرفته شد. پس از تهیه نمونههای مختلفی از آرماتورها و انجام آزمایش کشش مستقیم برروی آنها، میلگرد ساده با قطر ۸mm انتخاب گردید. برای هر نوع ورق یا میلگرد دو نمونه مطابق استاندارد ASTM تحت آزمایش کشش قرار گرفت. متوسط خواص مکانیک شامل تنش و کرنش حد تسلیم و تنش نهایی برای ورقهای فولادی به ترتیب، $\sigma_{yp}=۲۵۵۰\,kg/cm^2$، $\varepsilon_{yp}=۰/۰۰۲$ و $\sigma_{up}=۳۶۰۰\,kg/cm^2$ و برای میلگردهای فولادی بهترتیب، $\sigma_{yb}=۲۸۰۰\,kg/cm^2$، $\varepsilon_{yb}=۰/۰۰۲$ و $\sigma_{ub}=۴۵۰۰\,kg/cm^2$ است. با توجه بهقطر سوراخهای ورقها، از سنگدانههای با حداکثر اندازهٔ ۱۹mm استفاده شد. نسبتهای اختلاط برای مقاومت ۲۸ روزه نمونه استوانهای $۳۰۰\,kg/cm^2$ و اسلامپ حدود ۵cm محاسبه گردید.

۲-۱- ابعاد دالهای بتنی و مشخصات ورقهای سوراخدار

ابعاد کلیهٔ دالها ۱۳۰cm*۱۳۰cm*۱۰cm در نظر گرفته شد. ورقها دارای ابعاد ۱۲۵۰*۱۲۵۰*۱/۲۵ میلیمتر و سوراخهای دایروی به‌شکل منظم و متقارن بودند. الگوی ورق سوراخدار در نمونه PSPS-1 دارای سوراخهایی به قطر ۹۵mmوفواصل ۳۰mm شکل (۱) و الگوی ورق سوراخدار در نمونه‌های PSPS-2 و PSPS-3 دارای سوراخهایی به قطر ۷۵mm و فواصل ۲۴mm می‌باشد. در جدول (۱) مقادیر درصد حجمی فولاد کششی نمونههای مسلح به ورقهای سوراخدار ارائه شده است. طراحی ابعاد سوراخها به نحوی انجام شد تا اختلاف بین حداقل درصد حجمی فولاد و متوسط درصد حجمی فولاد موجود در نمونهها کم باشد [۸]. قطر سوراخها با توجه به آسانی بتن ریزی و جلوگیری از احتمال ایجاد حفرههائی در بتن یا سطح متخلخلی در زیر دال و همچنین جلوگیری از کاهش سطح مقطع فولاد در مقاطع ضعیف (جلوگیری از کاهش مقاومت خمشی) انتخاب شد.

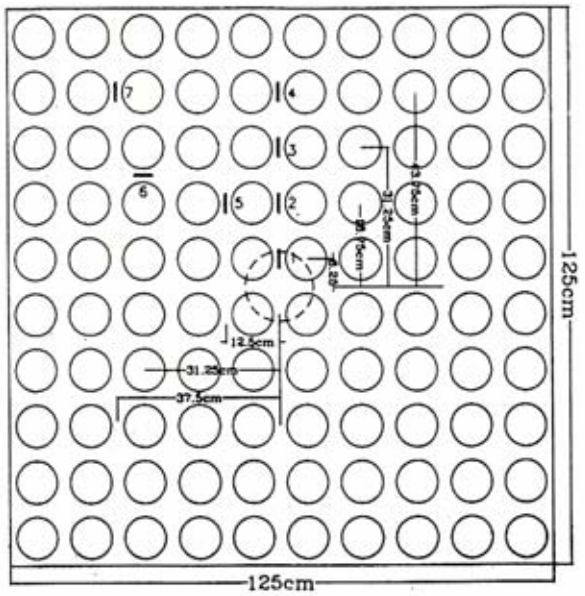
۲-۲- مشخصات دالهای مسلح به میلگردهای فولادی

نمونه های OR-1، OR-2 و OR-3 با میلگرد صاف به قطر ۸ میلیمتر برای مقایسه با نمونههای مسلح به ورقهای سوراخدار ساخته شد شکل (۲). جهت هماهنگی با ورقهای در دسترس، میلگردها از نوع ساده و از فولاد نرم انتخاب شدند. نمونهٔ OR-1 جهت مقایسه با نمونههای PSPS-1 و PSPS-2 و نمونه OR-3 جهت مقایسه با نمونه PSPS-3 ساخته شد. نمونه OR-2 با حدود ۵۰ درصد فولاد بیشتر نسبت به نمونه OR-1 و یک حد وسط (از لحاظ درصد حجمی فولاد) بین نمونههای PSPS-1، PSPS-2 و PSPS-3 در نظر گرفته شد.

۲-۳- میلگردهای فشاری دالها، پوشش بتن و کرنش سنجها

منطقه فشاری کلیهٔ نمونهها همانند دالهای آزمایش شده در سایر تحقیقات مسلح گردید [۷و۳]. درصد حجمی این میلگردها برابر با ۰/۰۰۲۳ و تقریباً به اندازهٔ فولاد حداقل جهت افت حرارت در نظر گرفته شد [۲]. در تمام نمونهها، پوشش محافظ بتنی در

منطقه کششی و فشاری برابر با ۲۰mm از میلگرد یا ورقهای سوراخدار در نظر گرفته شده است.



شکل ۱- الگوی ورقهای فولادی سوراخدار در دالها و محل نصب کرنش سنجها (نمونه PSPS-1)

جدول ۱- مشخصات حجمی فولاد کششی دالهای مسلح به ورقهای سوراخدار و دالهای مسلح به میلگرد

نمونه	حداقل درصد حجمی فولاد در ضعیفترین مقطع	متوسط درصد حجمی فولاد	متوسط / حداقل
PSPS-1	۰/۰۰۳	۰/۰۰۳۴	۱/۱۳
PSPS-2	۰/۰۰۳	۰/۰۰۳۷	۱/۲۳
PSPS-3	۰/۰۰۶	۰/۰۰۷۴	۱/۲۳
OR-1	۰/۰۰۳۵	۰/۰۰۳۵	۱/۰۰
OR-2	۰/۰۰۵	۰/۰۰۵	۱/۰۰
OR-3	۰/۰۰۶	۰/۰۰۶	۱/۰۰

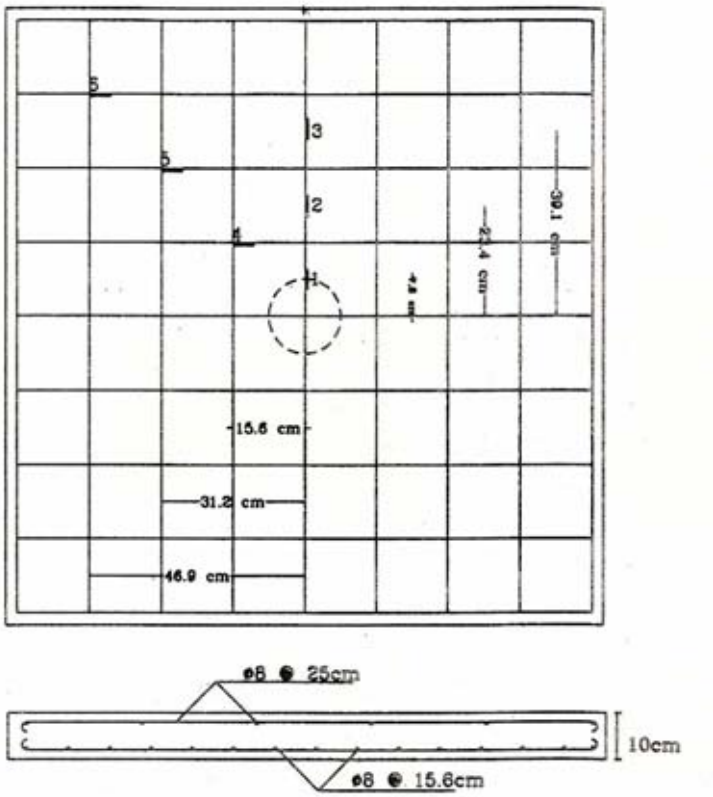
در شکلهای (۱ و ۲) موقعیت استقرار کرنش سنجها نشان داده شده است. یک دسته از کرنش سنجها در امتداد قطر اصلی و دسته دیگر در امتداد کوتاهترین بعد نمونهها نصب گردیدهاند.

۲-۴- نحوة انجام آزمایشها

با توجه به ابعاد نمونهها و ابعاد هندسی دستگاه بارگذاری و وسائل مورد نیاز جهت اندازهگیریها در زیر نمونهها، یک قاب فلزی جهت استقرار نمونه بر روی آن طراحی و ساخته شد [۸]. برای ایجاد شرایط تکیهگاهی ساده از سه لوله بقطر ۱/۵ اینچ استفاده شده است. دو لوله در بالای چهار چوب جوش شدند و سپس لوله سوم در داخل شیار بین آنها قرار میگرفت. بار توسط یک صفحة دایرهای (دیسک فولادی) با قطر ۱۵ سانتیمتر و ضخامت ۵ سانتیمتر به مرکز دال اعمال میشد. برای جلوگیری از تماس مستقیم صفحه با نمونه و جلوگیری از خردشدگی موضعی بتن از یک قطعه لاستیک مخصوص با ضخامت ۵ میلیمتر استفاده شد.

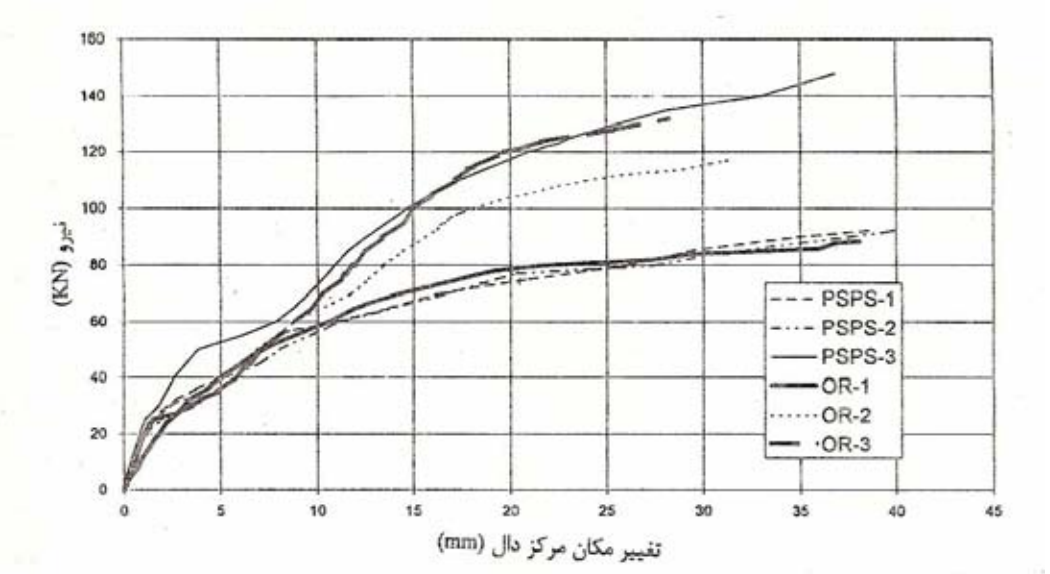
۳- نتایج آزمایشها، بحث و چهار چوب نظری رفتار دالها

۳-۱- نوع شکست و رفتار کلی



شکل ۲- نحوة استقرار آرماتورهای فولادی در دالها و محل نصب کرنش سنجها (نمونه OR-1)

برای بررسی رفتار دالها از دو معیار شکل ظاهری منحنی بار- تغییر مکان مرکز دال شکل (۳) و چگونگی توزیع و گسترش کرنش در جهتهای عرضی و قطری میلگردهای کششی و ورقهای سوراخدار مسلح کننده نمونهها استفاده شده است.



شکل ۳- منحنی های بار – افت دالهای با مقادیر و الگوهای مختلف فولاد مسلح کننده

در جـدول (۲) اطلاعات مربوط به بارهای ترک خوردگی، تسلیم و نهایـی بـههمـراه تغییر مکـان متناظـر با آنها در مرکز دال ارائه شده است.

جدول ۲- اطلاعات مربوط به بارهای ترک خوردگی، تسلیم و نهایی به همراه تغییر مکان متناظر با آنها، و نرمی و انرژی جذب شده در دالها

نمونه	f_c' (kg/cm^2)	$P_{cr}^{(1)}$ (kg)	$\Delta_{cr}^{(1)}$ (mm)	$P_y^{(2)}$ (kg)	$\Delta_y^{(2)}$ (mm)	$P_u^{(3)}$ (kg)	$\Delta_u^{(3)}$ (mm)	$\mu=\frac{\Delta_u}{\Delta_y}$	جذبانرژی (ton-cm)	$\frac{P_\sigma}{P_u}$
PSPS-1	۳۲۰	۳۲۰۰	۲/۶۵	۵۷۰۰	۸/۸۱	۹۲۵۰	۳۸/۷۵	۴/۴	۲۶/۳۹	۰/۳۵
PSPS-2	۳۴۰	۳۰۰۰	۲/۴۱	۵۸۰۰	۱۰/۵۳	۹۲۵۰	۴۰/۰۰	۳/۸	۲۷/۱۰	۰/۳۲
PSPS-3	۳۴۰	۴۰۰۰	۲/۵۷	۷۴۰۰	۱۰/۱۱	۱۴۸۰۰	۳۶/۵۸	۳/۶	۴۷/۰۴	۰/۲۷
OR-1	۳۴۰	۱۶۰۰	۱/۴۰	۶۷۰۰	۱۲/۸۰	۸۸۵۰	۳۸/۱۰	۳/۰۰	۲۵/۹۰	۰/۱۸
OR-2	۳۵۵	۲۲۰۰	۱/۳۹	۷۲۰۰	۱۲/۱۳	۱۱۷۵۰	۳۱/۴۲	۲/۶۰	۲۵/۴۸	۰/۱۹
OR-3	۳۰۰	۲۵۰۰	۱/۵۲	۷۷۰۰	۱۱/۴۴	۱۳۲۰۰	۲۸/۱۹	۲/۴۶	۲۳/۹۶	۰/۱۹

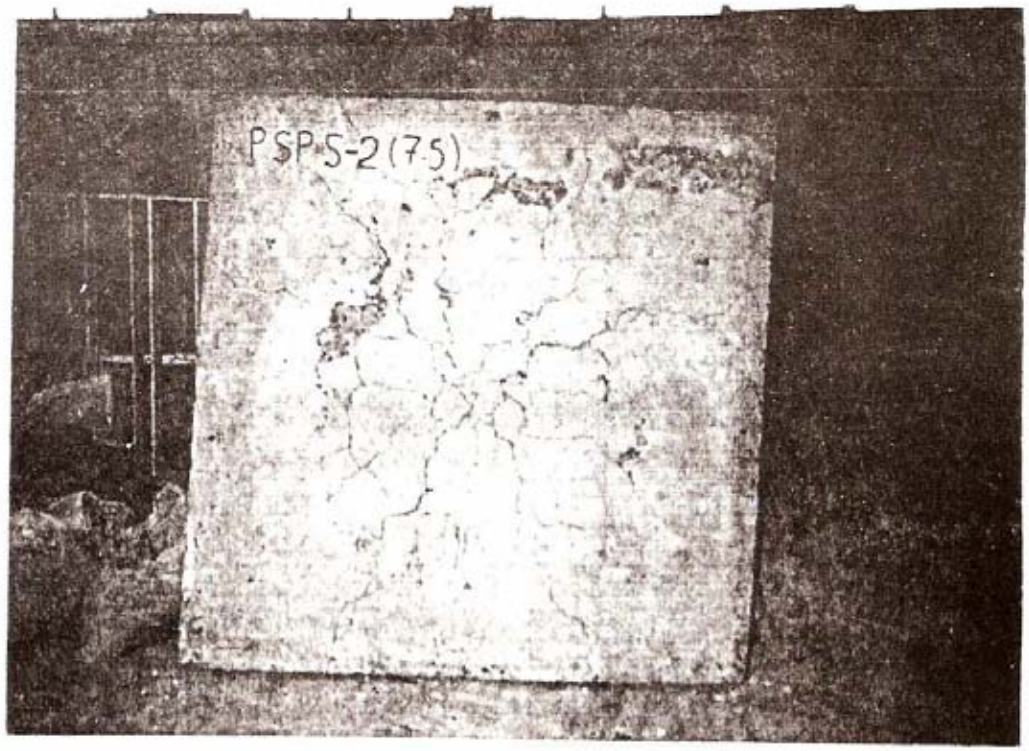
1- بار و تغییر مکان متناظر با ایجاد اولین ترک
2- بار و تغییر مکان متناظر با اولین تسلیم
3- بار و تغییر مکان نهائی

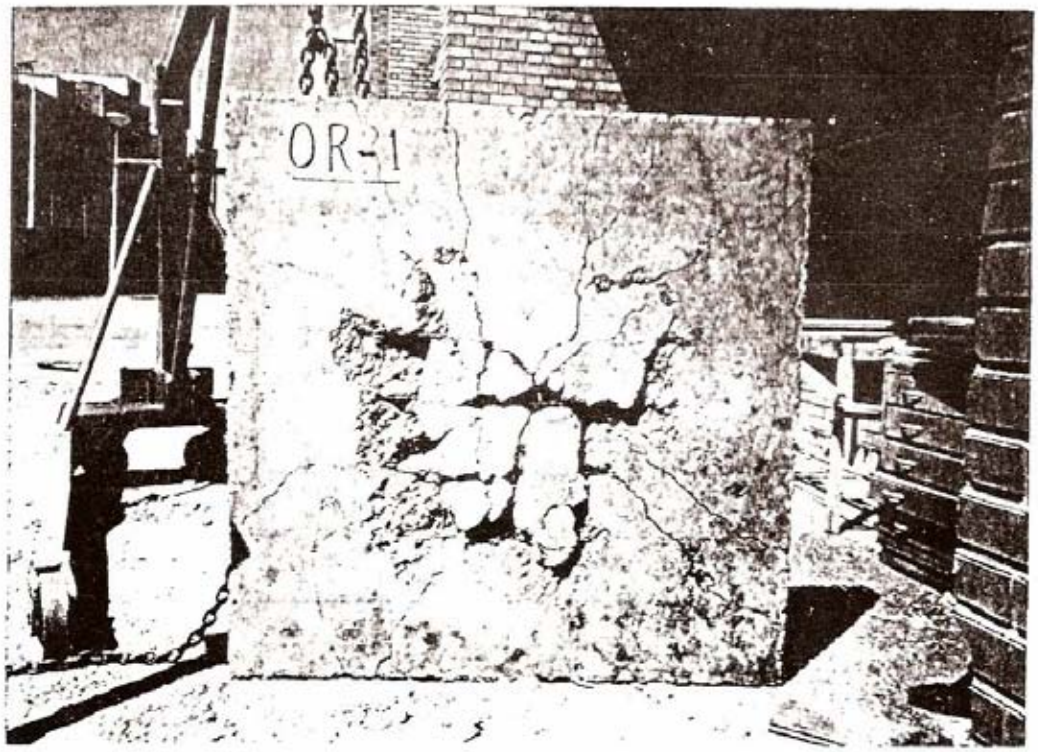
برای مثال دال PSPS-1 در بار ۵۷۰۰ kg به تسلیم رسیده است و در باری معادل ۹۲۵۰kg و تغییر مکانی برابر با ۳۸/۷ میلی‌متر، بصورت پانچ گسیخته گردید. دال PSPS-2 در بار ۵۸۰۰kg تسلیم شده است و در باری معادل 9250 کیلوگرم و تغییر مکان ۴۰mm بصورت پانچ گسیخته شد. دال OR-1 در باری معادل ۶۷۰۰kg به تسلیم رسیده است. علت اصلی افزایش بار تسلیم در نمونه OR-1 نسبت به نمونههای PSPS-1 و PSPS-2 بهدلیل تنش تسلیم کششی بیشتر میلگردها (حدود ۱۱ درصد) نسبت بهورقهای فولادی می‌باشد. مقایسه منحنی‌های بار – تغییر مکان نمونههای PSPS-1، PSPS-2 و OR-1 نشان می‌دهد که غیر از بخش ابتدائی تقریباً سه منحنی برهم منطبق می‌باشند. این نمونه در باری معادل ۸۸۵۰kg و با تحمل تغییر مکانی بهاندازهٔ ۳۸/۱mm گسیخته شد.

شیب منحنی بار - تغییر مکان در تمام مراحل بارگذاری برای نمونه PSPS-3 بهدلیل وجود درصد بیشتر فولاد و در نتیجـه افزایش سختی شبکه سوراخدار بیشتر از نمونههای PSPS-1 و PSPS-2 می‌باشد. نخستین نقطه دال PSPS-3 در بار ۷۴۰۰kg بهتسلیم رسیده است و این نمونه با تحمل تغییر مکان ۳۶/۵۸ میلی‌متر و در بار ۱۴۸۰۰kg بهصورت پانچ گسیخته شد. دال OR-3 در بار ۷۷۰۰kg به تسلیم رسیده است و نمونه با تحمل تغییر مکان ۲۸/۱۹ میلی متر در مرکز و در بار ۱۳۲۰۰kg بهصورت پانچ گسیخته شده است.

مقاومت و شکلپذیری نهائی نمونه PSPS-3 بیشتر از نمونه OR-3 است. شایانذکر است که مقدار حجمی فولاد و مقاومت فشاری نمونه PSPS-3 نسبت به نمونه OR-3 بهترتیب حدود ۲۳% و ۱۳% بیشتر و مقاومت تسلیم نمونه PSPS-3 نسبت بهنمونه OR-3 حدود ۱۱% کمتر است. بار تسلیم بیشتر نخستین نقطه در نمونهٔ OR-3 نسبت بهنمونه PSPS-3 بهدلیل مقاومت کششی بیشتر میلگردهای فولادی نسبت بهورقها است. نمونه دال OR-2 در بار ۱۱۷۵۰kg و تغییر مکان ۳۱/۴۲ میلی‌متر در مرکز بهصورت پانچ گسیخته شد.

بهطور کلی تمامی نمونهها پس از ارائهٔ رفتار خمشی نرم، بهصورت پانچ گسیخته شدند. خردشدگی بتن منطقه فشاری در هیچ یک از دالها مشاهده نگردید. شکل (۴) نمونههایی از دالهای مسلح به ورقهای سوراخدار و شبکهٔ میلگرد معمولی را پس از آزمایش نشان می‌دهد.





شکل ۴- نمونه هایی از دالهای مسلح به ورقهای سوراخدار و شبکه میلگرد معمولی پس از اتمام آزمایش

۳-۲- نرمی و جذب انرژی

در اینجا نرمی بهصورت نسبت تغییر مکان نهایی به تغییر مکان اولین تسلیم $\left(\mu=\frac{\Delta_u}{\Delta_y}\right)$ و قابلیت جذب انرژی بهصورت سطح زیر منحنی بار – تغییر مکان محاسبه شده است جدول (۲).

نمونههای PSPS-1 و PSPS-2 با درصد فولادی مشابه با نمونه OR-1 بهترتیب دارای نرمی ۴/۴ و ۳/۸ بوده در صورتی که نمونة OR-1 دارای نرمی ۳/۰۰ میباشد. درصد نرمی بیشتر نمونه PSPS-1 نسبت به نمونه OR-1 برابر با ۴۷ درصد و این افزایش برای نمونه PSPS-2 برابر با ۲۷ درصد می باشد. نرمی نمونه PSPS-3 نسبت به نمونه OR-3، ۴۶ درصد بیشتر است.

در نمونههای PSPS-1 و PSPS-2 با درصد حجمی فولاد تقریباً یکسان، نرمی نمونه PSPS-2 نسبت به نمونه PSPS-1 حدود ۱۴% کمتر است. قطر سوراخ ۹۵ میلیمتر در نمونه PSPS-1، ۱۲ درصد بیشتر بتن محصور شده در داخل سوراخها نسبت بهنمونه PSPS-2 با قطر سوراخ ۷۵ میلیمتر فراهم آورده است. با توجه به دو برابر بودن درصد حجمی فولاد در نمونه PSPS-3 نسبت بهنمونه PSPS-2، نرمی نمونه PSPS-3 فقط حدود ۵% از نرمی نمونه PSPS-2 کمتر میباشد. همچنین با توجه به دو برابر بودن درصد فولاد در نمونه PSPS-3 در مقایسه با نمونه OR-1، نرمی نمونه PSPS-3، ۲۰% بیشتر از نرمی نمونه OR-1 می باشد.

بهطور کلی میزان انرژی جذب شده توسط نمونههای مسلح بهورقهای سوراخدار بیشتر از میزان انرژی جذب شده توسط نمونههای مسلح بهمیلگرد میباشد. نسبت انرژی جذب شده توسط نمونههای PSPS-1 و PSPS-2 بهانرژی جذب شده توسط نمونه OR-1 بهترتیب برابر با ۱/۰۲ و ۱/۰۵ میباشد. در نمونههای مسلح بهمیلگرد با افزایش درصد فولاد مقطع میزان انرژی جذب شده توسط نمونه کاهش یافته است، در صورتیکه در نمونههای مسلح بهورقهای فولادی سوراخدار با افزایش درصد فولاد میزان جذب انرژی توسط نمونه افزایش یافته است. بهعنوان مثال میزان کاهش انرژی جذب شده توسط نمونه OR-3 نسبت بهنمونه OR-1 برابر با ۸ % میباشد در صورتی که نمونه PSPS-3 نسبت به نمونه PSPS-1 به میزان ۴۰% و نسبت بهنمونه PSPS-2 بهمیزان ۳۷% بیشتر انرژی جذب نموده است.

بنابراین دالهای مسلح بهورقهای سوراخدار در مقابل افزایش درصد فولاد زیاد حساس نبوده و میتوانند در درصدهای فولاد بالا نیز انرژی زیادی را جذب نمایند. مکانیزم اندرکنش بین بتن و ورقهای سوراخدار و یکپارچگی و انعطافپذیری ورقها و توزیع تنشها در ورق، رفتار بهتری را در دالها بهدلیل روش فولادگذاری بهوجود آورده و سبب بهبود نرمی و قابلیت جذب انرژی شده است.

۳-۳- بار نهائی

با در نظر گرفتن خطوط تسلیم برای دال با تکیه گاههای ساده و تحت اثر بار متمرکز مرکزی، با صرفنظر از اثر گوشهها و آرماتورهای فشاری و در نظر گرفتن a=۱۲۰cm و استفاده از روش کار مجازی، بار نهائی دالها محاسبه میشود. آئین نامه ACI لنگر نهائی مقاوم واحد عرض مقطع را بهصورت زیر ارائه میکند [۲]:

$$M_u = \rho f_y d^2\left(1-0.59\,\rho\frac{f_y}{f_c'}\right) \qquad (۱)$$

با تساوی کار خارجی و کار داخلی لازم برای ایجاد مکانیزم گسیختگی و با توجه بهتنش تسلیم در ورقها و میلگردهای کششی و مقدار d=۸cm در کلیة نمونهها، مقادیر بار نهائی خمشی $(P_u)_{flex}$ برای هر نمونه بهصورت زیر محاسبه میشود:

$$P_{flex} = 8\rho f_y d^2\left(1-0.59\,\rho\frac{f_y}{f_c'}\right) \qquad (۲)$$

در این رابطه برای نمونههای مسلح بهورق سوراخدار، (حجمی ρ_{ave}) $\rho=\frac{A_s}{bd}=1.25$ و برای نمونههای مسلح بهمیلگرد، (حجمی ρ) $\rho=1.25$ میباشد. مقادیر $(P_u)_{flex}$ محاسبه شده در جدول (۳) ارائه شدهاند. نظر بهاینکه درصد فولاد ورق سوراخدار در طول دال متغیر است، لذا از درصد حجمی در محاسبات تعیین ρ استفاده بهعمل آمد با توجه به مقاومت برشی دو طرفه توسط بتن مقادیر بار پانچ، $(P_u)_{pun}$، نیز برای کلیة نمونهها ارائه شده است. با توجه

بهنسبت $(P_u)_{exp}/(P_u)_{flex}$، روش خطوط تسلیم یک کرانه تحتانی برای مقاومت نهائی هر دو سیستم دال ارائه می‌کند.

جدول ۳- مقایسه بار محاسباتی به روش خطوط تسلیم و برش پانچ با بار آزمایش

نمونه	f'_c (kg/cm^2)	ρ_{min} حجمی	ρ_{ave} حجمی	$(P_u)_{exp}$ kg	$(p_u)_{flex}$ kg	$(p_u)_{pun}$ Kg	$\frac{(p_U)_{exp}}{(p_U)_{flex}}$	$\frac{(p_U)_{exp}}{(p_U)_{pun}}$
PSPS-1	۳۲۰	۰/۰۰۳	۰/۰۰۳۴	۹۲۵۰	۵۴۴۰	۱۱۰۰۰	۱/۷۰	۰/۸۴
PSPS-2	۳۴۰	۰/۰۰۳	۰/۰۰۳۷	۹۲۵۰	۵۹۱۵	۱۱۳۰۰	۱/۵۶	۰/۸۲
PSPS-3	۳۴۰	۰/۰۰۶	۰/۰۰۷۴	۱۴۸۰۰	۱۱۵۸۰	۱۱۳۰۰	۱/۲۸	۱/۳۱
OR-1	۳۴۰	۰/۰۰۳۵	۰/۰۰۳۵	۸۸۵۰	۶۱۴۰	۱۱۳۰۰	۱/۴۴	۰/۷۸
OR-2	۳۵۵	۰/۰۰۵	۰/۰۰۵	۱۱۷۵۰	۸۷۰۰	۱۱۵۵۰	۱/۳۴	۱/۰۲
OR-3	۳۰۰	۰/۰۰۶	۰/۰۰۶	۱۳۲۰۰	۱۰۳۰۰	۱۰۶۰۰	۱/۲۸	۱/۲۵

ρ_{ave} و ρ_{min} = به ترتیب درصد حجمی متوسط و حداقل فولاد در نمونههای مسلح به ورقهای سوراخدار در هر جهت، ρ = درصد حجمی فولاد در نمونههای مسلح بهمیلگردهای فولادی در هر جهت، $(P_u)_{exp}$ = بار نهائی حاصل از آزمایش، $(P_u)_{flex}$ = بار نهائی خمشی بر اساس روش خطوط تسلیم و $(P_u)_{pun}$ = بار نهائی متناظر با ظرفیت برشی دو طرفه نمونه.

برای نمونههای مسلح بهورقهای سوراخدار مقدار بار حاصل از آزمایش بین ۲۸% تا ۷۰% و برای نمونههای مسلح بهمیلگرد بین ۲۸% تا ۴۴% بیشتر از بار محاسباتی می‌باشد. بعد از تشکیل مفصلهای پلاستیک در دالها و گسترش خطوط تسلیم و بهدنبال آن افزایش شدید تغییر شکلها، نمونهها مقاومت بیشتری از خود نشان دادهاند، که بخشی از آن می‌تواند مرتبط با اثرات غشایی باشد.

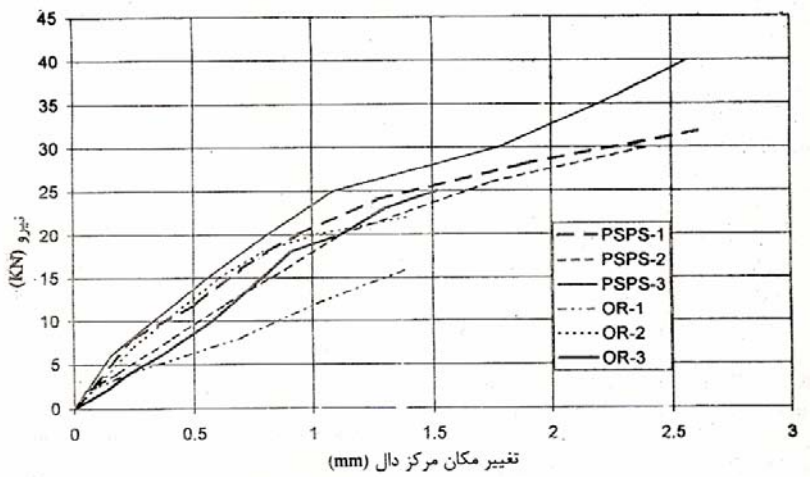
۳-۴- ترک خوردگی

جدول (۲) نشان می‌دهد که بار ترک خوردگی نمونههای مسلح به ورقهای سوراخدار از نمونههای مسلح به میلگردهای معمولی بیشتر است. مقاومت ترک خوردگی نمونههای PSPS-1 و PSPS-2 نسبت بهنمونه OR-1 (با درصد فولاد حجمی یکسان و نیزمقاومت فشاری بتن تقریباً یکسان) بهترتیب۱۰۰% و ۸۷/۵% بیشتر می‌باشد. همچنین بار ترکخوردگی نمونه PSPS-3 از نمونه OR-3، ۶۰% بیشتر است. نمونههای PSPS-1 و PSPS-2 با درصد فولاد تقریباً ۰/۵ درصد فولاد نمونه OR-3، بهترتیب ۲۸% و ۲۰% بیشتر بار تا ترکخوردگی تحمل کردهاند، نیز با درصد حجمی فولاد نمونه OR-2 تقریباً ۱/۵ برابر درصد فولاد موجود در نمونههای PSPS-1 و PSPS-2، بار ترکخوردگی نمونههای PSPS-1 و PSPS-2 نسبت بهنمونه OR-2 بهترتیب ۴۵% و ۳۶% بیشتر است. افزایش در بار ترکخوردگی، سختی بیشتر و جذب انرژی بیشتر نمونههای مسلح بهورقهای فولادی نسبت بهنمونههای مسلح معمولی در شکل (۵) نشان داده شده است.

۴- بررسی اقتصادی دالها

۴-۱- میزان فولاد مصرفی

بار ترک خوردگی (p_{cr}) دالهای مسلح به میلگردها حدود ۰/۲ P_u می‌باشد [۳]. نتایج حاصل از نمونههای مسلح بهمیلگرد، نیز در این حدود است جدول (۲). لیکن در نمونههای مسلح به ورقهای سوراخدار نسبت $\frac{p_{cr}}{p_u}$ بسیار بالاتر از ۲۰% می‌باشد و بهطور متوسط حدود ۰/۳۱ است.



شکل ۵- منحنی های بار – افت دالها تا اولین ترک

در جدول (۴) میزان فولاد مصرف شده برای نمونههای PSPS-1 و PSPS-2 و OR-1 آورده شده است. در محاسبهٔ میزان فولاد نمونه OR-1 از قلابها صرفنظر شده است (۱۴). وزن فولاد ورقهای سوراخدار قابل مقایسه با شکبه میلگرد استفاده شده در نمونه OR-1 میباشند. همانطور که در متن اشاره شد نمونههای PSPS-1 و PSPS-2 از نمونه OR-1 از لحاظ شکلپذیری، سختی، مقاومت ترکخوردگی و مقاومت شکست برتر میباشند.

جدول ۴- میزان فولاد مصرفی

نمونه	حجم فولاد مصرفی (cm^3)	وزن فولاد مصرفی (kg)	درصد افزایش یا کاهش نسبت به نمونه OR-1
PSPS-1	۱۰۶۷	۸/۳۲	-۵/۷
PSPS-2	۱۱۵۸	۹/۰۳	+۲/۳
OR-1	۱۱۳۱	۸/۸۲	—

۴-۲- ساخت ورق سوراخدار

لازم است که در هنگام استفاده عملی از این روش، این ورقها همانند سایر پروفیلهایی که امروزه در کارخانهای فولادسازی ساخته میشوند، تولید گردند. تولید انبوه این ورقها میتواند استفاده آنها را اقتصادی و قابل رقابت با میلگردهای فولادی نماید. توجه شود که استفاده از ورقهای سوراخدار هزینههای آرماتوربندی و مدت زمان لازم جهت بستن آرماتورها را نخواهد داشت [۹].

۵- نتیجه گیری و پیشنهادات

۱- بار ترکخوردگی نمونههای مسلح بهورقهای سوراخدار بهمقدار قابل توجهی بیشتر از نمونههای معمولی است. دالهای معمولی

در باری حدود ۲۰ درصد بار نهائی ترک خوردهاند در حالیکه بار ترکخوردگی نمونههای مسلح بهورقهای سوراخدار حدود ۳۱ درصد بار نهائی است.

۲- شکست دالهای بتنآرمه همراه با پانچ موضعی محل اعمال بار میباشد. مقاومت برشی دو طرفه بهعلت یکپارچگی و درگیری بهتر بتن و فولاد در دالهای مسلح بهورقهای سوراخدار بیشتر میباشد. بعد از تشکیل و گسترش خطوط تسلیم در نواحی مختلف و افزایش تغییر شکلها، نمونههای مسلح بهورقهای سوراخدار بهواسطهٔ عمل غشائی خود بارهای بیشتری را تحمل کردهاند.

۳- رفتار دالهای مسلح بهورقهای سوراخدار در محدودهٔ مود شکست خمشی نرم بوده است.

۴- نرمی و قابلیت جذب انرژی دالهای مسلح بهورقهای سوراخدار در مقایسه با دالهای مسلح بهمیلگردهای فولادی بیشتر است. نرمی نمونههای مسلح بهورقهای سوراخدار حدود ۳۰ الی ۵۰ درصد بیشتر از نمونههای مشابه مسلح بهمیلگرد است. این افزایش، بهدلیل انعطافپذیری، یکپارچگی ورقها و توزیع نیروها در تمام جهتهای ورقها و اندرکنش مناسب بین بتن و ورقهای سوراخدار میباشد.

۵- افزایش درصد فولاد تأثیر زیادی در رفتار دالهای مسلح بهورقهای سوراخدار ندارد و رفتار تمامی این نمونهها در محدودهٔ مود شکست خمشی نرم قرار داشته است.

۶- پیشنهاد میشود تا ورقهای سوارخدار در کارخانههای فولادسازی ساخته و بهصورت انبوه تولید شوند. در سیستم جدید هزینههای مرتبط با آرماتوربندی و زمان اجرای دالها کمتر از سیستم مسلح معمولی است. ورقهای سوراخدار را میتوان با مواد کامپوزیت بهجای فولاد ساخت و بکار برد. لازم است تحقیقاتی روی رفتار دالهای مسلح بهورقهای سوراخدار کامپوزیت انجام گیرد. استفاده از ورقهای سوراخدار در قسمت فشاری دالها نیز نیاز بهبررسی دارد.

تشکر و قدردانی

بدینوسیله از حمایتهای پژوهشی معاونت پژوهشی دانشگاه صنعتی شریف در انجام این پروژه تحقیقاتی قدردانی میشود. همچنین از مدیر و کارکنان کارگاه شهید شوریده و مدیر کارگاه مرکزی، کارکنان آزمایشگاه بتن و مصالح آقایان چراغعلی، سلیمانی، بختیاری، قنبری و جمالی پور، مدیر آزمایشگاه مکانیک سازه دانشگاه صنعتی شریف آقای دکتر حسینی و کارکنان آزمایشگاه آقایان ابراهیمی و شاملو در انجام این مطالعه تحقیقاتی قدردانی و تشکر بعمل میآید.

مراجع

[1] Park, R and Paulay, T., “Reinforced Concrete Sturctures”, John Wiley and Sons Inc. 1975, 769p.

[2] “Building Code Requirements for Reinforced Concrete (ACI 318-99)”, ACI Pub., 1999, 391p.

[3] Marzouk, H. and Hussein, A., “Experimental Investigation on the Behavior of High-Strength Concrete Slabs”, ACI Structural Journal, Nov-Dec. 1991, PP. 701-713.

[4] Elgabry, A.A. and Ghali, A., “Design of Studs-Shear Reinforcment for Slabs”, ACI Structural Journal, May-June 1990, PP. 350-361.

[5] Ghali, A. and Hammill, N., “Effectiveness of Shear Reinforcement in Slabs”, Concrete International, ACI, Jan. 1992, PP. 60-65.

[6] Khaloo, A.R., and Ahmad, S.H., “Behavior of Concrete under Combined Shear and Compressive Stresses”, ACI Materials Journal, V. 85, No. 6, Nov-Dec. 1988, pp. 551-559.

[7] Clarke, J.L. and Birjandi, F.K., “Punching Shear Resistance of Lightweight Aggregate Concrete Slabs”, Magazine of Concrete Research, No. 152, 1990, PP. 171-176.

[۸] رئیسی دهکردی، م، "بررسی رفتار دالهای دو طرفه مسلح به ورقهای فولادی سوراخدار،" رساله کارشناسی ارشد مهندسی سازه، دانشگاه صنعتی شریف، ۱۳۷۱، ۲۱۲ صفحه.

[۹] خالو، ع، "استفاده از ورقهای سوراخدار در دالهای بتنی" شماره و تاریخ ثبت اختراع ۲۴۷۸۳-۱۳۷۲/۳/۲۶