

رفتار سازه‌های پانل‌های ساندویچی بتنی پیش‌ساخته با اتصالات برشی خرپایی شکل تحت بارهای جانبی

الله داد احمدی^۱، اشکان ترابی^{۲*}، آرش توتونچی^۳، داود صفری^۴

- ۱- دانشجوی دکتری سازه، گروه مهندسی عمران، واحد مرودشت، دانشگاه آزاد اسلامی، مرودشت، ایران
- ۲- استاد یار، گروه مهندسی عمران، واحد مرودشت، دانشگاه آزاد اسلامی، مرودشت، ایران
- ۳- استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد مرودشت، دانشگاه آزاد اسلامی، مرودشت، ایران
- ۴- استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد شیراز، دانشگاه آزاد اسلامی، شیراز، ایران

Email: Ashkan.torabi@miau.ac.ir

تاریخ پذیرش ۱۴۰۱/۰۹/۲۷

تاریخ دریافت ۱۴۰۱/۰۵/۰۸

چکیده

در این مقاله رفتار سازه‌های پانل‌های ساندویچی بتنی پیش‌ساخته برای امکان استفاده آنها به عنوان اجزاء دال در ساخت و سازه‌های صنعتی به صورت تجربی و عددی مطالعه شده است. این پانل‌ها متشکل از سه لایه هستند، لایه‌ها عبارتند از: یک لایه بتن مسلح به عنوان لایه فوقانی، یک لایه ضخیم از بتن سبک به عنوان لایه میانی یا هسته و یک لایه بتن معمولی یا بتن سبک مسلح مقاوم در مقابل کشش به عنوان لایه تحتانی. این لایه‌ها توسط شبکه میلگرد با اتصالات برشی خرپایی شکل به یکدیگر متصل شده‌اند. اهداف این تحقیق بررسی عملکرد مرکب و پارامترهای تاثیرگذار در باربری پانل‌های ساندویچی بتنی برای کاربرد در سازه‌ها در راستای سبک‌سازی و صنعتی کردن ساخت و ساز است. برای این منظور، ابتدا نمونه‌های آزمایشگاهی تحت آزمایش خمش قرار گرفت. سپس مطالعه تحلیلی مدل المان محدود پانل‌های ساندویچی با مشخصات و ویژگی‌های مکانیکی مشابه آزمایش تجربی با نرم‌افزار ABAQUS انجام شده است. نتایج نشان داد: پانل‌های ساندویچی با دو لایه بتن نسبت به پانل‌های ساندویچی با سه لایه بتن، دارای ظرفیت باربری و سختی کمتر می‌باشند، همچنین وقتی که پانل‌های ساندویچی پیش‌ساخته به عنوان دال یک‌طرفه رفتار می‌کنند، قراردادن اتصالات برشی موازی محور (بعد بزرگتر) برای همبستگی دو لایه بتنی به منظور عمل کردن آنها به عنوان یک واحد کافی است. نتایج مطالعات آزمایشگاهی و مدل المان محدود مقایسه شد و درجه قابل توجهی از دقت بدست آمد. بنابراین دال ساندویچی بتنی پیش‌ساخته می‌تواند به عنوان جایگزین مناسب برای سیستم دال بتنی معمولی در ساختمان باشد.

واژگان کلیدی: مطالعات آزمایشگاهی، مدل المان محدود، بتن سبک، پانل ساندویچی بتنی پیش‌ساخته، اتصالات برشی

۱- مقدمه

ساختار سازه‌های ساندویچی عموماً از لایه بالا، لایه میانی (هسته) و لایه پایین تشکیل می‌شود. سفتی هسته در راستای عمود بر لایه‌ها باید به اندازه‌ای باشد که بتواند لایه‌ها را در فاصله طراحی شده نگه داشته و سفتی خمشی کلی سازه را تامین نماید. استحکام برشی هسته نیز باید به اندازه کافی باشد تا در هنگام خمش سازه، لایه‌ها نسبت به یکدیگر لغزش نداشته باشد. در غیر این صورت خاصیت ساندویچ بودن از بین می‌رود و لایه‌ها مانند تیر یا ورق‌های مجزا عمل می‌کنند. پانل‌های ساندویچی پیش‌ساخته بتنی مورد مطالعه از لایه فوقانی و تحتانی بتنی مقاوم و هسته بتن سبک تشکیل شده است که به وسیله اتصال دهنده‌های برشی با فواصل مساوی به یکدیگر متصل شده‌اند. ترتیب و فواصل اتصالات در پانل‌های ساندویچی بتن پیش‌ساخته به عواملی مانند: عملکرد مرکب مطلوب، بار اعمال شده، دهانه پانل و نوع اتصالات برشی بستگی دارد. نسبت به درجه عملکرد مرکب به دست آمده، یک پانل ساندویچی بتنی پیش‌ساخته ممکن است به

عنوان یک پانل کاملاً مرکب، نیمه مرکب یا غیر مرکب در نظر گرفته شود [3-4].

کاملاً مرکب: در این پانل لایه‌های بتنی به صورت یک واحد یکسان و با هم در برابر بارهای اعمال شده تا لحظه شکست عمل می‌کنند. پانل کاملاً مرکب با شکسته شدن بتن و یا جاری شدن آرماتورهای لایه بتن مسلح، بدون گسیختگی اتصال دهنده‌های برشی گسیخته می‌شود (شکل ۱-الف).

پانل نیمه مرکب: در پانل‌های نیمه مرکب اتصال دهنده‌های برشی، فقط بخشی از کل برش را که در حالت کاملاً مرکب منتقل می‌شود را انتقال می‌دهند. در این نوع پانل، اتصال دهنده‌های برشی قبل از شکسته شدن بتن و یا جاری شدن آرماتورهای لایه بتن مسلح، گسیخته می‌شوند (شکل ۱-ب).

پانل غیر مرکب: اگر اتصال دهنده‌های برشی که لایه‌های بتن مسلح را به یکدیگر متصل می‌کنند، ظرفیت تحمل انتقال کامل برش را نداشته باشد، عملکرد مستقل لایه‌ی بتنی باعث می‌شود پانل به صورت غیر مرکب عمل کند (شکل ۱-ج).

شکل ۱. توزیع کرنش در پانل ساندویچی تحت خمش

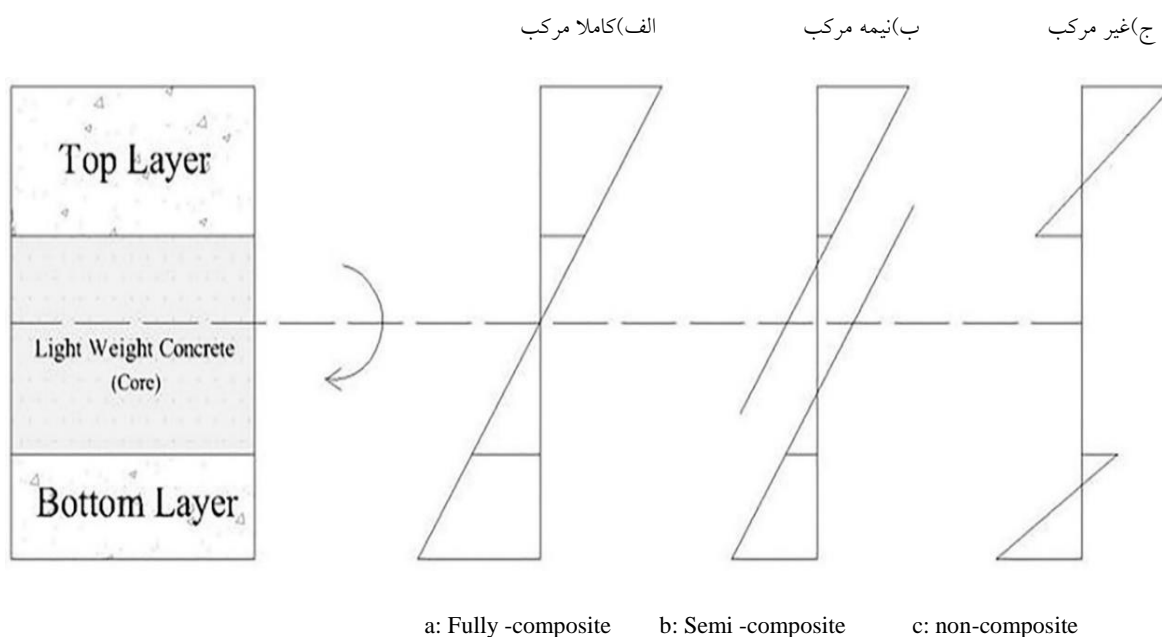


Fig. 1. Strain distribution in the sandwich panel under flexural load

در چند دهه اخیر تحقیقات زیادی در مورد پانل‌های ساندویچی پیش‌ساخته انجام شده است. اولین بار در سال ۱۹۶۷ میلادی سیستم پانل‌های پیش‌ساخته ساندویچی تری دی^۱ توسط شخصی به نام ویکتور وایزمن در ایالت کالیفرنیا آمریکا به ثبت رسید و تحت عنوان پانل‌های ساندویچی به روش بتن‌پاشی در پای کار (شاتکریت) به بازار جهانی معرفی شد و در صنعت ساختمان مورد استفاده قرار گرفت. در میان پژوهش‌های انجام شده، اینیا و همکارانش در سال ۱۹۹۴ یک سیستم پانل ساندویچی بتن پیش‌ساخته با یک مقاومت حرارتی بالا و کارایی سازه‌ای بهینه را مورد بررسی قرار دادند [1]. بنایون و همکارانش در سال ۲۰۰۷ و ۲۰۰۸ ظرفیت مقاومت محوری (بار محوری) و رفتار سازه‌ای پانل‌های ساندویچی پیش‌ساخته بتنی را بررسی کردند [2-3-4]. شومن و همکارانش در سال ۲۰۰۸ سیستم ساندویچی بتن سبک FRP هیبریدی را جهت بهبود سیستم دال ساندویچی پیش‌ساخته مورد بررسی قرار دادند [5-6-7]. احمد و محمود در سال ۲۰۱۱ رفتار سازه‌ای پانل‌های ساندویچی بتنی پیش‌ساخته سبک را از نظر زیست محیطی و هم از نظر سازه‌ای و گرمایشی بررسی کردند [8]. علی داوود در سال ۲۰۱۳ رفتار سازه‌ای پانل‌های دال ساندویچی مرکب را بررسی کرد [9]. نوریده و همکارانش در سال ۲۰۱۴ رفتار سازه‌ای پانل‌های ساندویچی فوم بتن سبک وزن با اتصالات برشی خرپایی شکل را تحت بار خمشی مورد بررسی قرار دادند [10]. کاظم و همکارانش در سال ۲۰۱۵ سازوکار انتقال برش FRP و فوم را برای استفاده در پانل‌های ساندویچی بتنی مورد بررسی قرار دادند [11]. جوزف در سال ۲۰۱۶ رفتار خمشی پانل‌های ساندویچ بتنی پیش‌ساخته با دولایه خارجی بتن مسلح و لایه میانی پلی استایرن با اتصالات برشی فولادی را تحت شرایط بارگذاری مختلف مورد مطالعه قرار دادند [12]. آمران و همکارانش در سال ۲۰۱۶ رفتار سازه‌ای پانل‌های ساندویچی فوم بتن را تحت بارگذاری خمشی مورد بررسی قرار دادند [13 و 14]. کارتیک راماکریشنان و همکارانش در سال ۲۰۱۶ به صورت تجربی پاسخ سرعت متوسط ضربه را روی پانل‌های

ساندویچی با هسته‌های مختلف مطالعه کردند [15]. توماس و چن در سال ۲۰۱۶ پانل‌های ساندویچی شامل دولایه بتن رویه و هسته فوم^۲ با اتصالات برشی FRP^۳ را مورد بررسی قرار دادند [16]. یوسف و همکارانش در سال ۲۰۱۷ آنالیز استاتیکی و دینامیکی پانل‌های ساندویچی شامل دولایه خارجی بتنی و لایه میانی پلی استایرن با اتصالات برشی FRP که دو لایه بتنی بالا و پایین را به هم متصل می‌کردند را با استفاده از مدل المان محدود غیر خطی مورد بررسی قرار دادند [17].

دانیل و همکاران در سال ۲۰۱۸ رفتار خمشی پانل‌های ساندویچی بتنی پیش‌ساخته تحت بارهای متفاوت و برش پانچینگ را با آزمایش تجربی بررسی کردند [18]. ونچانگ و همکارانش در سال ۲۰۱۹ سازوکار انتقال برش را در پانل‌های ساندویچی با دو لایه عایق و سه لایه بتن با اتصالات برشی پلیمری تقویت شده با الیاف شیشه‌ای (GFRP) را مورد بررسی قرار دادند [19]. ریچارد و همکارانش در سال ۲۰۲۰ عملکرد حرارتی پانل‌های ساندویچی سبک وزن با دو لایه خارجی بتنی و لایه میانی (هسته) فوم را با استفاده از دستگاه صفحه داغ به صورت تجربی مورد بررسی قرار دادند [20]. سانی محمد و همکاران در سال ۲۰۲۱، مقاومت حرارتی پانل‌های ساندویچی با رویه‌های بتنی و هسته پلی استایرن را به صورت تجربی و عددی مورد مطالعه قرار دادند [21].

این مقاله نتایج بررسی رفتار سازه‌ای پانل‌های ساندویچی بتنی پیش‌ساخته به عنوان دال یکطرفه را تحت خمش ارائه می‌کند. با توجه به تحقیقات گذشته، در این تحقیق رفتار سازه پانل‌های ساندویچی پیش‌ساخته با رویه‌های بتنی مقاوم و هسته بتن سبک با اتصالات برشی، تحت خمش بررسی شده است. جنبه نوآوری این تحقیق، استفاده از بتن سبک سازه‌ای حاوی پوکه صنعتی لیکا در لایه میانی (هسته) و لایه تحتانی می‌باشد. این سیستم پانل ساندویچی با توجه به ویژگی‌هایی مانند قابلیت تولید صنعتی، پیش‌ساخته بودن، چندلایه‌ای بودن، ارتقاء کیفیت، سبک سازی، سرعت بالا در اجرا و کاهش

2- foam core

3- Fiber-Reinforced Polymer(FRP)

1-panel 3D sandwich

پانل‌های ساندویچی در تعداد لایه‌ها می‌باشد. در پانل‌های ساندویچی با سه لایه، بتن لایه تحتانی فقط نقش پوشاننده میلگرد را دارد و دارای کمترین ضخامت است، در بعضی حالت‌ها بتن سبک لایه میانی می‌تواند همین نقش را بازی کند. بنابراین می‌توان به جای بتن مقاوم لایه تحتانی از بتن سبک استفاده کرد. پانل‌ها به گونه‌ای تهیه شده‌اند که هر کدام از پانل‌ها رفتار تقریباً کامپوزیت دارند. پانل‌ها با ابعاد یکسان می‌باشند. این پانل‌ها با نسبت بعد بزرگتر L به بعد کوچکتر B برابر $۳/۷۱$ ($L/B = ۳/۷۱$) را می‌توان به عنوان دال یک‌طرفه در نظر گرفت. ابعاد و جزئیات پانل‌های آزمایشی در شکل (۳) و جدول (۱) آورده شده است.

هزینه در ساختمان‌سازی، یکی از انواع سیستم‌های صنعتی در راستای سبک‌سازی و گامی موثر در این زمینه می‌باشد. اهداف این تحقیق بررسی عملکرد کامپوزیت و پارامترهای تاثیرگذار در باربری، بهبود و توسعه پانل‌های بتنی ساندویچی هیبریدی برای کاربرد در سازه‌ها در راستای سبک‌سازی و صنعتی کردن ساخت و ساز است، که موضوع جالب و مطرحی در مهندسی سازه می‌باشد.

۲- معرفی مدل‌های آزمایشگاهی

پانل‌های ساندویچی بتنی پیش‌ساخته مورد مطالعه از لایه فوقانی و لایه تحتانی بتن مسلح و هسته بتن سبک تشکیل شده است که لایه‌های فوقانی و تحتانی با اتصالات برشی خرابایی شکل به یکدیگر متصل شده‌اند (شکل ۲). تفاوت بین

شکل ۲. مقطعی از پانل‌های ساندویچی با اتصالات برشی خرابایی شکل

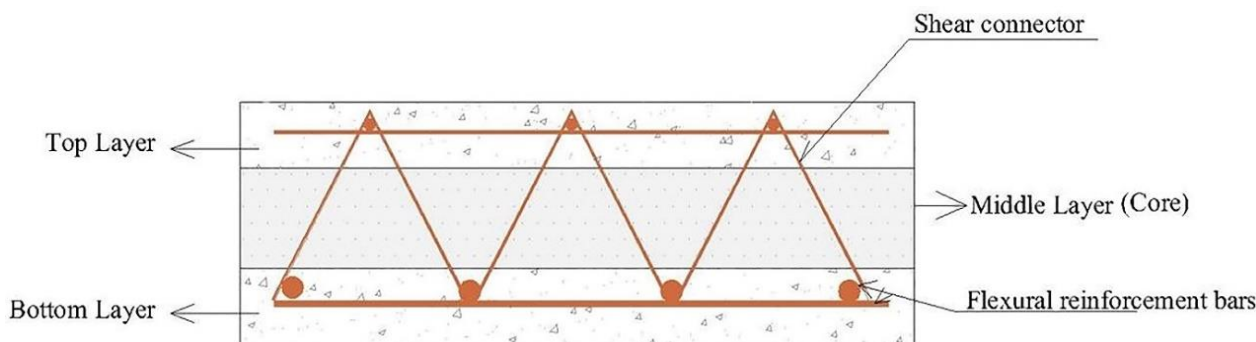


Fig. 2. A cross section of sandwich panel with truss-shaped shear connector

جدول ۱. جزئیات و مشخصات پانل‌های ساندویچی بتنی پیش‌ساخته

Panel.no	Bottom Layer	Middle Layer or (Core)	Top Layer	shear connector	L (mm)	b (mm)	d (mm)
P ₁	ordinary concrete	lightweight concrete	ordinary concrete	truss-shaped rebar	2600	700	180
P ₂	lightweight concrete	lightweight concrete	ordinary concrete	truss-shaped rebar	2600	700	180

Table.1. Details and design properties of the precast concrete sandwich panels

شکل ۳. مقطعی از طرح پانل‌های ساندویچی بتنی پیش‌ساخته (همه ابعاد به میلی متر است)

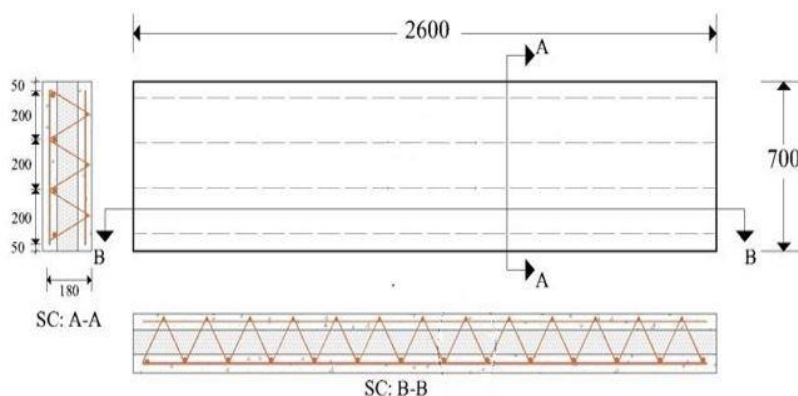


Fig. 3. Details of the one-way precast concrete sandwich panels design (all dimensions in mm).

۶ میلی‌متر تشکیل شده و در فواصل ۲۰۰ میلی‌متر از یکدیگر در جهت طول و عرض قرار دارند به یکدیگر متصل شده‌اند.

ب) پانل ساندویچی بتنی با دو لایه بتن مسلح

پانل ساندویچی (P_2) شبیه حالت الف می‌باشد، با این تفاوت که در این مدل بتن مقاوم لایه تحتانی را که فقط نقش پوشاننده میلگرد دارد و دارای کمترین ضخامت است که به دلیل اینکه بتن سبک لایه میانی می‌تواند همین نقش را بازی کند حذف و از بتن سبک لایه میانی استفاده شده است.

۲-۲- مشخصات مصالح و اعضاء پانل‌های ساندویچی بتنی

الف) لایه فوقانی: این لایه از بتن مسلح معمولی با طرح اختلاط و مشخصات مکانیکی مطابق جدول (۲ و ۳) تشکیل شده است. بتن مسلح معمولی دارای کمترین فولاد بوده و به میزان میلگرد حرارتی دال بتنی محدود می‌شود (جدول ۳).

۱-۲- انواع پانل‌های ساندویچی بتنی پیش ساخته

پانل‌های مورد مطالعه بر اساس نوع بتن، تعداد لایه‌ها دو نوع نوع به شرح زیر می‌باشند.

الف) پانل ساندویچی بتنی با سه لایه بتن مسلح

پانل ساندویچی (P_1) متشکل از سه لایه: یک لایه بتن مسلح پر مقاوم به عنوان لایه فوقانی (فشاری) به ضخامت ۶۰ میلی‌متر و شبکه میلگردهای طولی و عرضی مسلح کننده بتن به قطر ۶ میلی‌متر با چشمه 200×200 میلی‌متر، پوشش بتنی روی میلگردها ۳۰ میلی‌متر، لایه میانی شامل بتن سبک به ضخامت ۸۰ میلی‌متر، لایه تحتانی شامل لایه بتن مسلح مقاوم در برابر کشش به ضخامت ۴۰ میلی‌متر و شبکه میلگردهای طولی و عرضی مسلح کننده بتن به قطر اسمی ۱۰ میلی‌متر با چشمه 200×200 میلی‌متر و پوشش بتنی ۳۰ میلی‌متر می‌باشد. سه لایه بتن با اتصال دهنده‌های برشی خرپایی که از میلگرد به قطر

جدول ۲. مشخصات مکانیکی بتن لایه فوقانی

Type of concrete	Tensile strength (Mpa)	Compressive strength (Mpa)	Density (kg/m ³)
Ordinary concrete	4.7	36.7	2303

Table 2. Mechanical specifications of top layer concrete

جدول ۳. مشخصات مکانیکی میلگرد لایه فوقانی

Diameter of rebar (mm)	yield tension (f_y) (Mpa)	rupture tension (f_u) (Mpa)	Density (kg/m ³)
6	378	558	7990

Table 3. Mechanical specifications of top layer rebar

جدول ۳. مشخصات مکانیکی بتن لایه میانی (هسته)

Type of concrete	Tensile strength (Mpa)	Compressive strength (Mpa)	Density (kg/m ³)
Lightweight concrete	3.9	18.2	1748

Table 4. Mechanical specifications of middle layer concrete (core)

جدول ۴. مشخصات مکانیکی میلگرد لایه تحتانی

Diameter of rebar (mm)	Yield tension (f _y) (Mpa)	Rupture tension (f _u) (Mpa)	Density (kg/m ³)
10	420	625	7436

Table 5. Mechanical specifications of bottom layer rebar

تحتانی نسبت به لایه میانی جلوگیری می‌کند. بطور کلی اتصال دهنده‌های برشی برای انتقال بارها از لایه فوقانی به لایه تحتانی استفاده شده‌اند. مشخصات مکانیکی میلگرد اتصال دهنده برشی مطابق جدول (۳) استفاده شده است.

(د) **لایه تحتانی:** این لایه در پانل P_۱ از بتن معمولی و در پانل P_۲ از بتن سبک با مشخصات مکانیکی به ترتیب مطابق جدول (۲ و ۴) استفاده شده است، که در حالت کششی ترک خواهد خورد ولی در داخل آن شبکه آرماتور با مشخصات مکانیکی مطابق جدول (۵) وجود دارد که نقش گیرنده کشش ناشی از خمش را بازی می‌کند. این لایه نقش پوشاننده میلگرد را از لحاظ مقاومت در مقابل زنگ زدگی و آتش سوزی دارد و دارای ضخامت حداقل می‌باشد.

۳- آماده سازی تجهیزات آزمایشگاه

برای انجام آزمایش ابتدا دو تکیه‌گاه متناسب با نمونه‌های مورد آزمایش با ورق فولادی طراحی و ساخته شد سپس با استفاده از پیچ و مهره (انکر بولت) به کف محکم و فیکس شدند. ابزار دقیق مورد نیاز شامل؛ دستگاه ضبط و پردازش سیگنال (Data Logger)، مبدل جابه‌جایی ولتاژ خطی (LVDT)، جک فشاری هیدرولیکی، لودسل (Load cell) و سیستم کامپیوتر تهیه و کالیبره شدند.

(ب) **لایه میانی (هسته):** این لایه از بتن سبک حاوی سبک‌دانه لیکا می‌باشد، که دو کاربرد دارد: یکی دادن ارتفاع لازم برای ایجاد بازوی خمش‌گیر در پانل که هر چه بیشتر باشد مقاومت خمشی دال بیشتر می‌شود و دیگری اینکه نیروی برشی در پیرامون دال را تحمل می‌کند و مقداری نیز در حمل فشار ناشی از خمش کارایی داشته و کمک می‌کند. یکی از مهمترین وظایف آن این است که از کماتش اتصالات برشی داخل بتن که از پایه‌های مورب دو طرفه تشکیل شده‌اند جلوگیری کند و باعث می‌شود که این میله‌ها بتوانند بیشترین مقاومت فشاری ناشی از برش را از خود نشان دهند. در این لایه از بتن سبک حاوی دانه‌های سبک از نوع پوکه صنعتی لیکا و مشخصات مکانیکی مطابق جدول (۴) استفاده شده است.

(ج) **اتصال دهنده‌های برشی:** میلگردهای فشاری- کششی دو طرفه داخل بتن سبک می‌باشند که نقش آنها گرفتن برش به ویژه در دو انتهای پانل است. نیروی برشی توسط بتن سبک و همچنین توسط اتصال دهنده‌های برشی مقاومت می‌شود، همچنین این میلگردها باعث اتصال لایه‌های فوقانی و تحتانی شده و از جدایی آنها به علت ترک خوردگی بتن سبک جلوگیری می‌کند، در ضمن اتصال خاص میلگردهای میانی به میلگردهای موجود در لایه‌های فوقانی و تحتانی نقش برشگیر را در پانل‌های کامپوزیت ایفا کرده و از لغزش لایه فوقانی و

تنظیمات لازم روی سیستم کامپیوتر انجام شد. بارهای خمشی به شکل بارهای جانبی دو خطی اعمال شدند. چگونگی اعمال بار خمشی و شرایط مرزی و تکیه گاههای انتهایی در شکل (۴) نشان داده شده است. بار وارد شده به وسیله یک دستگاه مبدل نیرو متصل به جک هیدرولیکی فعال شد. نیروی وارد شده از جک به عنوان بار یک نقطه‌ای منتقل می‌شود و سپس با استفاده از یک تیر ورق I شکل در عرض نمونه‌ها به صورت دو خطی توزیع می‌شود. نمونه‌ها تا لحظه شکست (گسیختگی) تحت بارهای خمشی با روند افزایشی ثابت قرار گرفتند.

۴-الگوهای ترک خوردگی و بار نهایی شکست

در بررسی تجربی، بار خمشی با افزایش ثابت تا زمان شکست به پانل‌های ساندویچی اعمال شد. با افزایش بار اعمال شده در نمونه‌های آزمایش ترک‌ها از لایه تحتانی به سمت لایه فوقانی گسترش یافتند و مقادیر ثبت شده در جدول (۶) آورده شده است. اولین ترکها در بارهای ۲۵ و ۲۳ کیلو نیوتن به ترتیب برای پانل‌های P_1 و P_2 ظاهر شدند.

۳-۱- تنظیمات آزمایش

نمونه آزمایشگاهی با استفاده از یک دستگاه آزمایش یونیورسال با ظرفیت ۲۵۰ کیلونیوتن تحت آزمایش خمشی قرار گرفت. پانل ساندویچی بتنی پیش‌ساخته به عنوان دال یکطرفه بصورت افقی مورد آزمایش خمشی چهار نقطه‌ای قرار گرفت. برای این منظور، نمونه آزمایشگاهی روی تکیه‌گاه ساده (مفصلی) در عرض (طرف کوتاه) قرار گرفت و تنظیم و تراز شد. برای انجام آزمایش جک فشاری هیدرولیکی به لودسل (Load cell) متصل شد. سپس لودسل به تیر ورق توزیع بار متصل و در ناحیه $\frac{1}{3}$ میانی پانل قرار گرفت. لودسل با سیم رابط به دستگاه ضبط و پردازش سیگنال (Data Logger) متصل شد. سپس دو مبدل جابه‌جایی ولتاژ خطی (LVDT) یکی روی پانل و دیگری در زیر پانل در وسط دهانه برای ثبت تغییر مکان ایجاد شده در اثر اعمال بار به وسیله جک هیدرولیکی، نصب و با سیم رابط به کانال‌های دستگاه دیتا لاگر (Data Logger) نصب شدند. پس از اتصال دستگاه دیتا لاگر به سیستم کامپیوتر،

شکل ۴. جزئیات تنظیمات آزمایش خمشی پانل‌های ساندویچی (کلیه اندلزه‌ها به میلی‌متر می‌باشد)

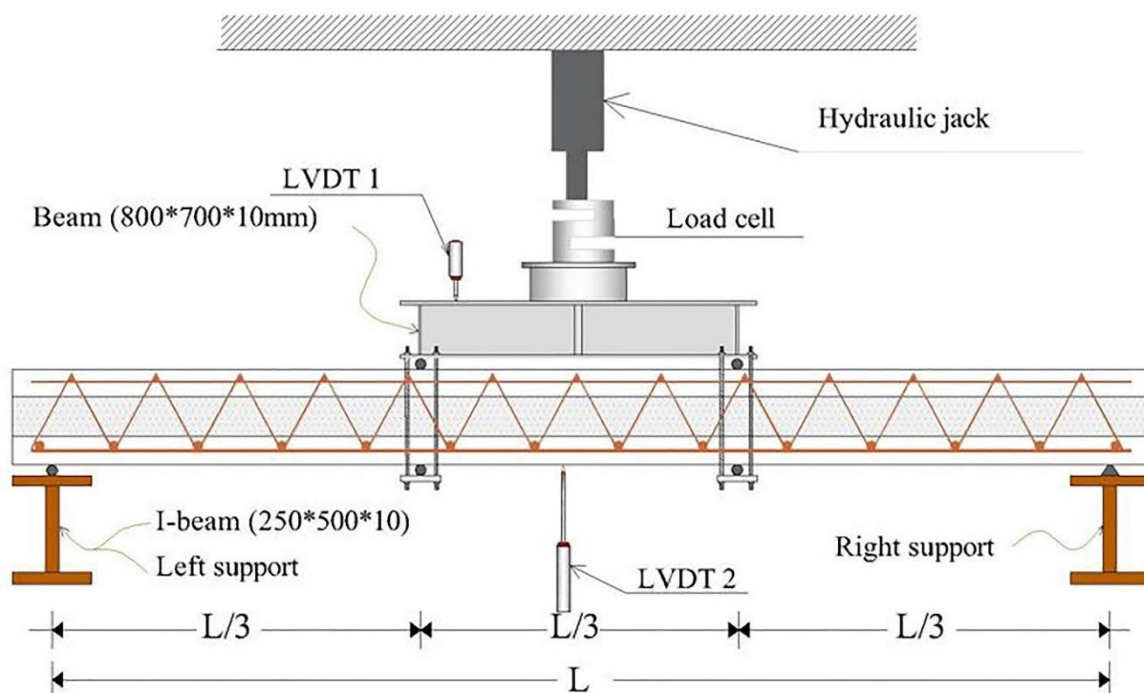


Fig. 4. Details of the flexural test setup of sandwich panels (all dimensions in mm).

الگوی ترک خوردگی در بتن لایه پایین قابل توجه بود. پانل‌ها زمانی به بار نهایی خود رسیدند که ترک‌های عمده در ناحیه میانی پانل‌های ساندویچی در لایه پایین گسترش یافت. بطور قابل توجهی بیشتر ترک‌های خمشی تحت بارهای خطی اعمال شده ایجاد شده‌اند و خمش خالص در دهانه میانی پانل‌ها ایجاد شده است. الگوهای ترک در هر مرحله بارگذاری روی سطح نمونه مشاهده و علامت‌گذاری شد. برای وضوح بهتر سازوکار گسترش ترکها در زیر پانل ساندویچی، ترسیم شدند (شکل ۶ و ۷).

در جدول (۶) ظرفیت بار نهایی (P_u) هر پانل و نیرویی که اولین ترکها (P_{cr}) ظاهر شدند آمده است. با استفاده از داده‌های ثبت شده توسط دستگاههای ضبط و پردازش سیگنال (Data Logger) روی سیستم کامپیوتر حاصل از بارگذاری مدل آزمایشگاهی تا لحظه گسیختگی، نمودار نیرو - تغییرمکان رسم شده است (شکل ۸).

جدول ۶. بارهای اولین ترک خوردگی و ظرفیت بار نهایی

Panel no.	P_{cr} , kN	P_u , kN	$P_u - P_{cr}$
			P_u
P_1	25	63	39.7
P_2	23	59	39

Table.6. First cracks and ultimate load capacity for sandwich panels

شکل ۵. جزئیات تنظیمات آزمایش خمش نمونه‌های آزمایشگاهی

**Fig. 5.** Details of the flexural test setup of experimental specimens

شکل ۶. الگوی ترک خوردگی در لایه پایین پانل P1

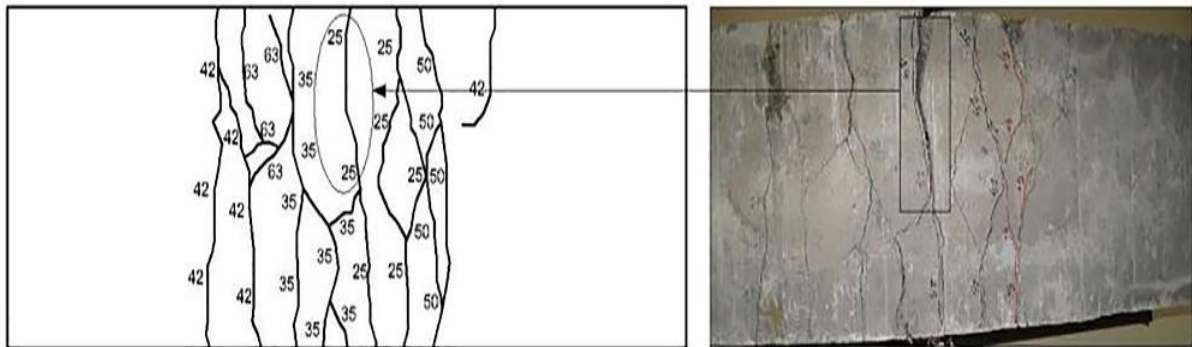


Fig. 6. Cracking patterns at the bottom concrete wythe for panel P₁

شکل ۷. الگوی ترک خوردگی در لایه پایین پانل شماره P2

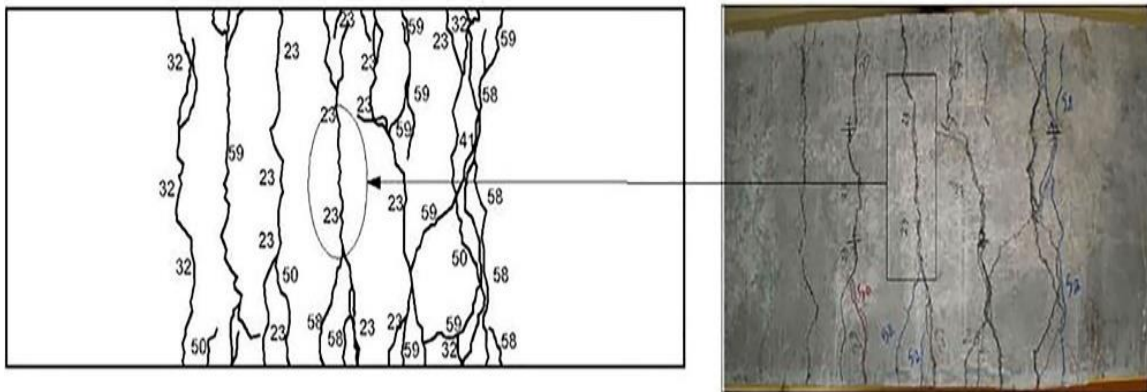


Fig. 7. Cracking patterns at the bottom concrete wythe for panel P₂

شکل ۸. نمودار بار- تغییرمکان در میانه دهانه برای پانل‌های ساندویچی

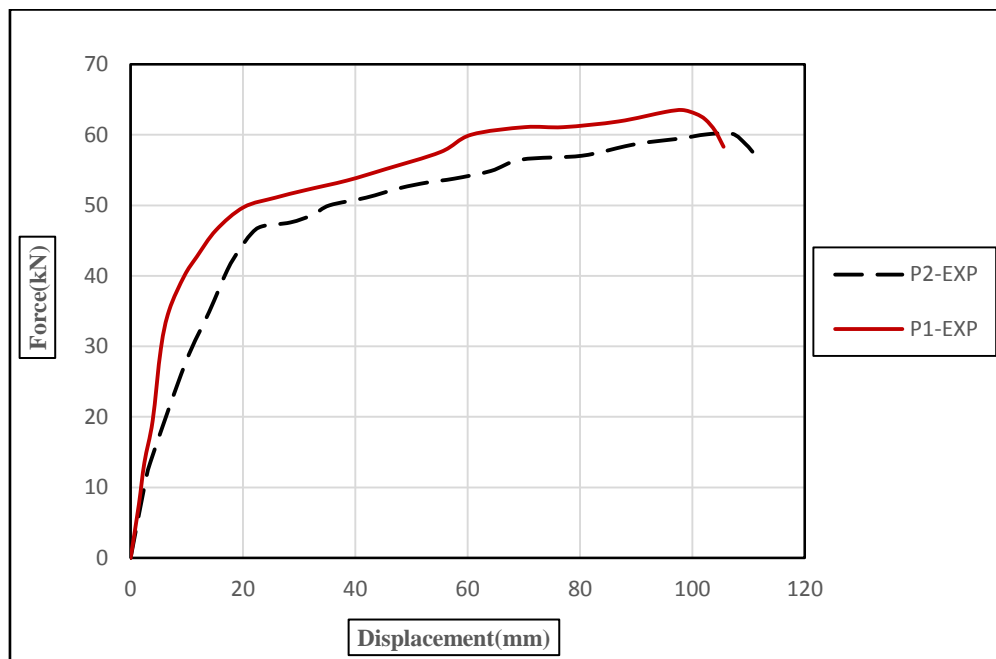


Fig. 8. Load-deflection profile at mid-span for sandwich panels

۵- مدل سازی و تحلیل المان محدود

در این تحقیق از نرم افزار ABAQUS به دلیل قابلیت‌هایی از جمله «محیط گرافیکی مناسب، امکان تولید مدل‌های پیچیده، دقت، سهولت اعمال تغییر در مدل‌های مختلف برنامه و امکان تعریف خسارت و خروجی‌های بسیار متنوع» استفاده شده است [22]. در مدل‌سازی سعی شده است که ساده‌سازی به حداقل برسد و مدل ساخته شده از نظر هندسی و سایر مشخصات کاملاً مشابه با نمونه اصلی و قابل اجرا باشد. تحلیل با استفاده از روش حل صریح (Explicit) انجام می‌شود. برای تعریف رفتار غیر خطی بتن از مدل رفتاری (مصالح) موجود در نرم‌افزار ABAQUS به نام Plasticity Concrete Damaged (مدل ترکیبی پلاستیک - خسارت بتن) استفاده شده است. برای مدل‌سازی بتن از المان solid و میلگردها از المان wire استفاده شده است. شبکه میلگرد لایه فوقانی و تحتانی و میلگرد برشی اتصال دهنده دو شبکه در مدول Assembly با استفاده از دستور Merge به هم پیوند داده شده‌اند. در مدول Mesh با استفاده از معادلات مرتبه دوم برای لایه بتن در تمام نمونه‌ها از المان Hex (المان مکعبی ۶ وجهی ۸ گرهی) استفاده شده است. ابعاد مش در تمام نمونه‌ها با توجه به پیچیدگی مدل و دقت در تحلیل ۲/۵ سانتی‌متر می‌باشد. شبکه میلگردها در لایه‌های بتن با قید Embedded region مقید شده است. برای مدل‌سازی پانل‌ها، اتصال لایه‌های بتن با استفاده از قید زمانی surface to surface

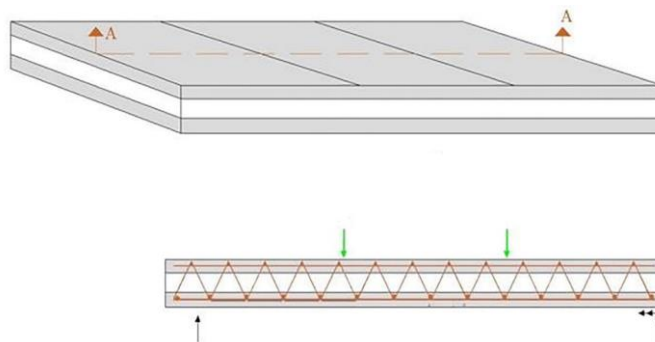
contact بین دو سطح با ضریب اصطکاک ۰/۹ بین لایه‌ها تعریف شده و رفتار سیستم به صورت Hard contact معرفی شده است.

۵-۱- مدل‌سازی پانل‌های ساندویچی بتنی پیش ساخته

در این تحقیق مدل‌های غیرخطی، برای بررسی رفتار سازه‌ای پانل‌های ساندویچی و پیش‌بینی ظرفیت مقاومت نهایی آنها، تحت بار خمشی اجرا شد. بر این اساس با فرض اینکه مصالح فولاد و بتن انتخاب شده، مواد غیر خطی هستند تحلیل غیرخطی انجام شده است. فرضیاتی که در ساخت مدل‌ها در نظر گرفته شده عبارتند از:

- هیچ لغزش نسبی بین میلگردها و بتن اتفاق نمی‌افتد.
- لغزش بین میلگردهای طولی و اتصال دهنده‌های برشی نادیده گرفته شده است.
- فولادهای طولی و اتصال دهنده‌های برشی از یکدیگر جدا نمی‌شوند.
- ابعاد و مشخصات مکانیکی مصالح بتن و فولاد در مدل‌سازی و تحلیل غیرخطی المان محدود مشابه مقادیر آزمایش تجربی که از طریق آزمایش‌های استاندارد بدست آمده بود، استفاده شده است. پانل‌های ساندویچی با عملکرد یک‌طرفه به شکل سه بعدی مدل شده‌اند. برای شرایط مرزی؛ در یک انتها تکیه‌گاه مفصلی و در انتهای دیگر تکیه‌گاه غلتکی با فاصله ۱۰ سانتی‌متر از لبه مدل‌ها در زیر پانل در نظر گرفته شده است.

شکل ۹. مدل سه بعدی پانل ساندویچی، شرایط مرزی و بار خمشی



SEC: A-A

Fig. 9. 3D model sandwich panel, boundary conditions and flexural loading

تفاوت منحنی‌های بار - تغییر مکان ناشی از پیچیدگی ذاتی رفتاری و عدم قطعیت‌های مربوط به شرایط آزمایشگاهی، مصالح و روش ساخت و سختی مدل المان محدود نسبت به مدل تجربی می‌باشد و در محدوده مجاز قرار دارد. نمودار تغییر شکل در وسط دهانه برای پانل P1 در مدل‌های المان محدود و تجربی در مراحل مختلف بارگذاری در شکل (۱۰) نشان داده شده است. از نظر تحلیلی، مدل‌های المان محدود (FEM) به طور قابل توجهی سخت‌تر از نمونه آزمایش شده واقعی (EXP) پس از وقوع ترک خوردگی، به ویژه در بار نهایی در هنگام شکست شدند. هر دو مطالعه پیوند کاملی را بین فولاد و بتن نشان دادند. در مقایسه بین نمودارهای نیرو - تغییر مکان در مدل‌های عددی و نمونه آزمایشگاهی، هماهنگی خوبی بین نتایج وجود دارد که ناشی از فرضیات و روش مدل سازی مناسب می‌باشد. بررسی‌های تجربی و تحلیل مدل‌های المان محدود، دقت قابل قبولی از تغییر شکل و بار نهایی در هنگام شکست تحت بارهای خمشی روی پانلهای ساندویچی یک طرفه را نشان دادند. مدل‌های المان محدود رفتار واقعی کمتر نسبت به نمونه‌های آزمایشگاهی را نشان دادند. بطور کلی مقادیر بدست آمده از مدل‌های تجربی و المان محدود قابل قبول بودند. بررسی‌های تجربی و عددی نشان دادند اتصال دهندهای برشی استفاده شده دارای سختی و مقاومت کافی برای ایجاد همبستگی لازم هستند.

انتقال (حرکت) در جهت Y در هر دو انتها مهار شد و انتقال افقی (جهت X) در یک تکیه گاه محدود شد تا مطابق شکل (۴) در آزمایش تجربی واقعی شود. بار اعمالی به پانل به صورت کنترل تغییر مکان در مرکز دال بدست می‌آید، بدین ترتیب که در $\frac{1}{3}$ میانی دهانه پانل بر روی سطح لایه فوقانی تغییر مکان در دو خط در عرض پانل که به فاصله ۸۰ سانتی متر از یکدیگر قرار دارند اعمال شده است. شرایط مرزی و بارگذاری خمشی در شکل (۹) نشان داده شده است.

۶- مقایسه

نتایج تحلیل اجزا محدود پانل‌ها با داده‌های تجربی مقایسه شده است. همبستگی خوبی بین نتایج مدل اجزا محدود و نتایج تجربی بدست آمده، مشاهده شد. نتایج نشان داد پانل ساندویچی با دو لایه بتن نسبت به پانل ساندویچی سه لایه‌ای دارای ظرفیت باربری و سختی کمتری در ناحیه خطی می‌باشد.

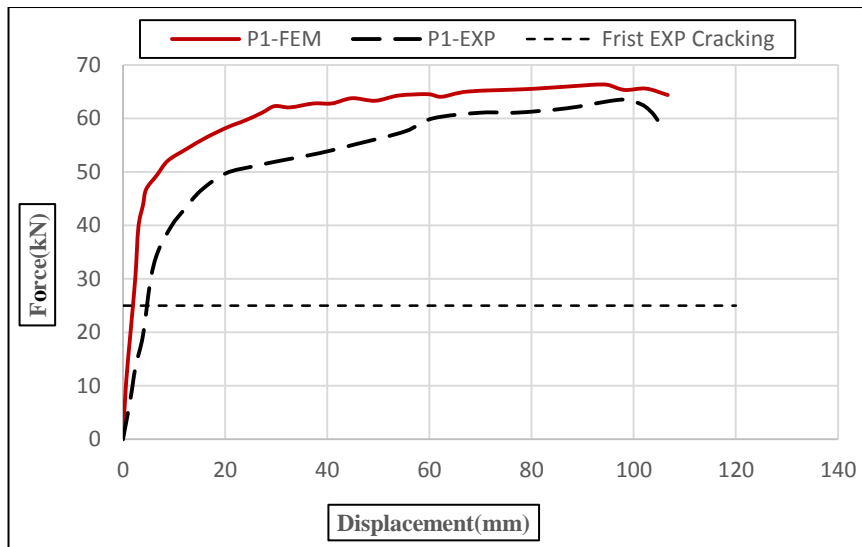
۶-۱- نمودار بار - تغییر مکان

نمودارهای بار - تغییر مکان حاصل از نتایج آزمایش تجربی و تحلیل المان محدود با یکدیگر مقایسه شدند. همانطور که در جدول (۷) نشان داده شده است. بیشترین اختلاف بین منحنی تجربی و المان محدود مربوط به پانل شماره ۱ (P1) ۱۹/۲۳ درصد و پانل شماره ۲ (P2) ۱۸/۵ درصد می‌باشد.

جدول ۷. بیشترین تفاوت نمودارهای بار - تغییر مکان مدل‌های تجربی و المان محدود

Panel no.	flexural strength capacity, kN		$\frac{EXP-FEM}{EXP}$
	EXP	FEA	
P ₁	52	62	19.23
P ₂	54	64	18.5

Table 7. Maximum difference of Load-deflection profile of EXP and FEM

شکل ۱۰. نمودار بار- تغییر مکان در میانه دهانه برای پانل P₁Fig. 10. Load-deflection profile of mid-span for panel P₁

جدول ۸. مقایسه بین ظرفیت مقاومت نهایی مدل تجربی و المان محدود

Panel no.	Ultimate flexural strength capacity, kN		EXP-FEM
	EXP	FEA	EXP
P1	63	66	4.76
P2	59	64	8.47

Table.8. Comparison between ultimate strength capacity of EXP and FEM

۶-۳- الگوهای ترک خوردگی

در هر دو مدل عددی آزمایشگاهی، بار به صورت خمش چهار نقطه‌ای و به روش تغییر مکان کنترل اعمال شده است. الگوی ترک خوردگی در نمونه آزمایشگاهی، تغییر شکل و الگوی ترک در مدل عددی به ترتیب در شکل (a) ۱۱، (b) ۱۱ و (c) ۱۱ نشان داده شده است، همانطور که مشاهده می‌شود در هر دو مدل عددی و تجربی، حداکثر ترک‌ها در دهانه میانی بدلیل تمرکز تنش و نوع بارگذاری بوجود آمده است. مقایسه الگوی ترک خوردگی در مدل المان محدود با نمونه آزمایشگاهی، همبستگی خوبی را در ناحیه ترک خودگی، راستای ترک و شدت ترک نشان می‌دهد.

۶-۲- ظرفیت مقاومت نهایی

مقادیر ظرفیت مقاومت نهایی پانل‌های آزمایش شده به صورت تجربی و تحلیلی با استفاده از مدل‌های المان محدود (FEM) بدست آمده است (جدول ۸). مقادیر ظرفیت مقاومت نهایی پانل‌های ساندویچی مورد مطالعه به وسیله تحلیل مدل المان محدود در مقایسه با نتایج تجربی، برای پانل P₁ و P₂ به ترتیب حدود ۴/۷۶ و ۸/۴۷ درصد افزایش داشت. اختلاف در بار نهایی به این دلیل است که مدل‌های المان محدود رفتار سختی دارند (سفت ترند) یا ناشی از خطاهای ناخواسته است که در تنظیم (کالیبره) کردن دستگاه‌های مورد استفاده در آزمایشگاه رخ داده است. با توجه به مقایسه نتایج دو مطالعه، ظرفیت مقاومت نهایی و تغییر شکل، هماهنگی قابل توجه و میزان بالایی از دقت را نشان دادند.

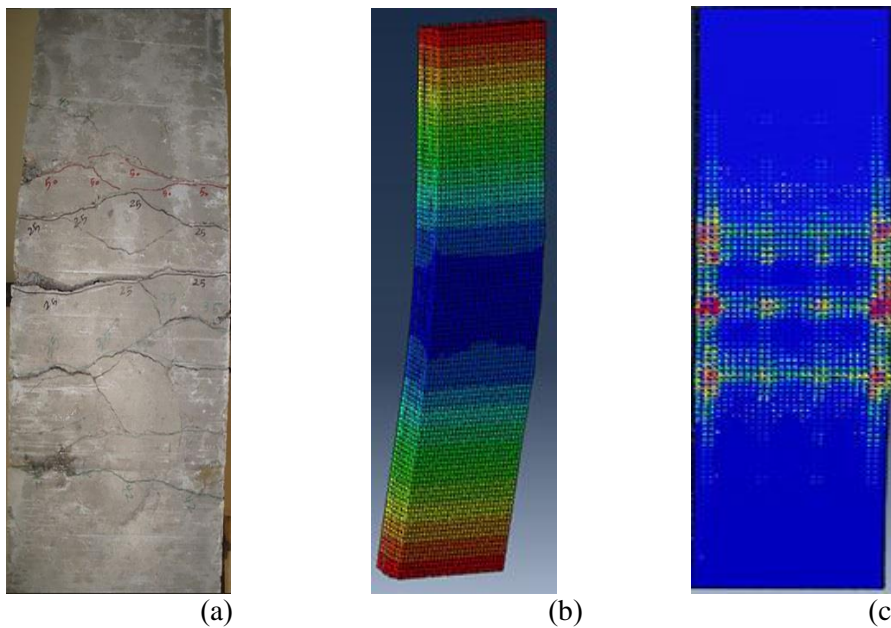
شکل ۱۱. مقایسه الگوی ترک بین نتایج مدل تجربی و عددی برای پانل P₁

Table 11. Comparison cracking patterns between results of experimental and numerical models for panel P1

با توجه به اشکال (۱۲ و ۱۳) بدست آمده از آنالیز المان محدود پانل ساندویچی P₁ در حالت استفاده از اتصال برشی در دو جهت X و Y و در جهت X و جهت Y، نتایج نشان می‌دهد وقتی که پانل ساندویچی پیش‌ساخته به عنوان دال یک طرفه رفتار می‌کند، قراردادن اتصالات برشی موازی محور X (بعد بزرگتر) برای همبستگی دولایه بتنی به منظور عمل کردن آنها به عنوان یک واحد کافی است.

۶-۴- تاثیر جهت گیری اتصالات برشی

برای بررسی تاثیر جهت گیری اتصالات برشی، پانل ساندویچی پیش ساخته بتنی با سه لایه بتن (P₁) در نرم افزار ABAQUS مدل سازی و تحلیل شده است. منحنی های نیرو-تغییر مکان پانل ساندویچی P₁ با اتصالات برشی در راستای XY و X و Y در شکل (۱۲) نشان داده شده است.

شکل ۱۲. مقایسه منحنی های نیرو - تغییر مکان در جهت گیری اتصالات برشی

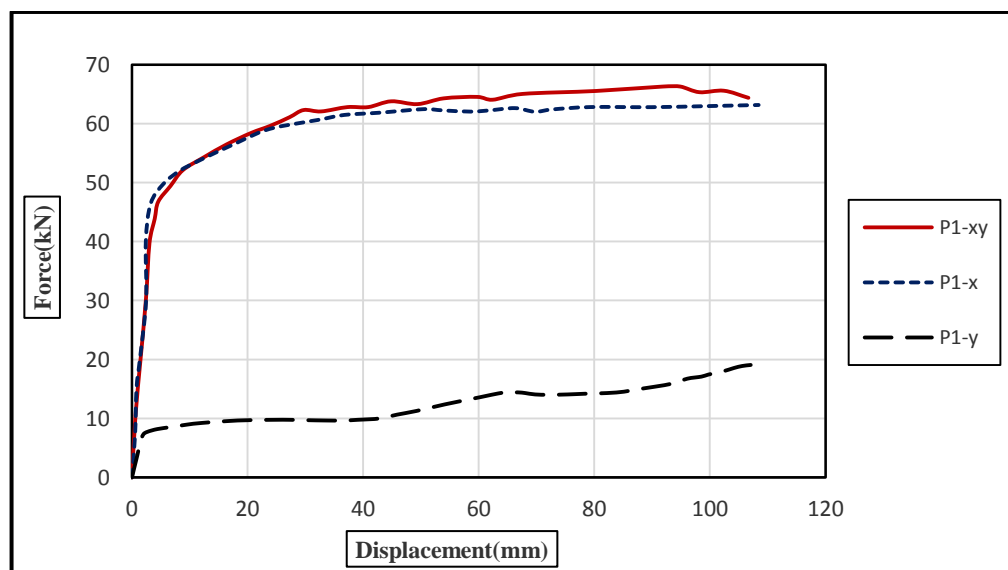


Fig. 12. Comparing the load-deflection profiles in orientation of the shear connectors

شکل ۱۳. نمای سه بعدی ABAQUS از تغییر شکل (Ut-U33)

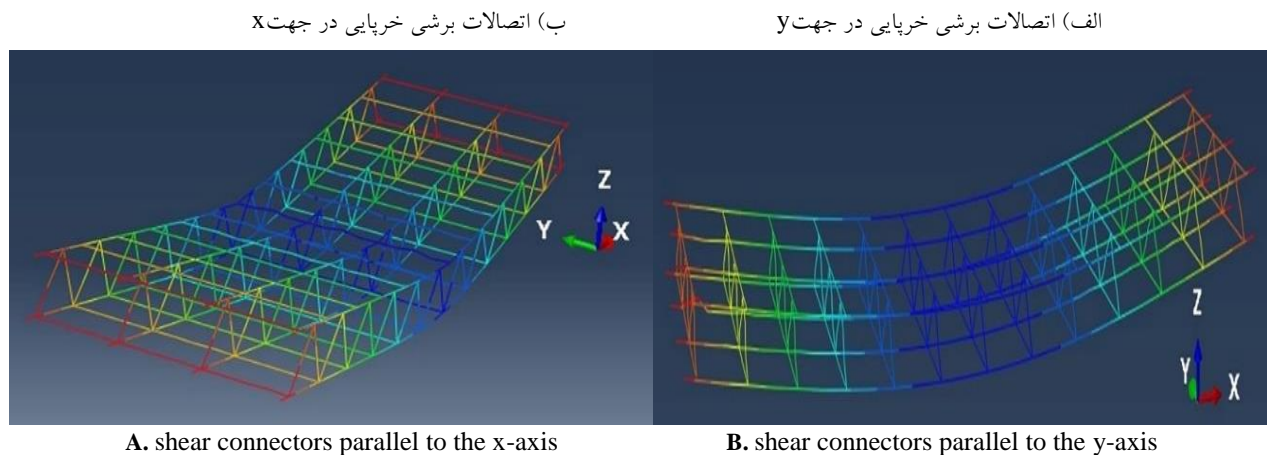


Fig. 13. 3D model ABAQUS software of deflection (Ut-U33)

۷- نتیجه گیری

این مقاله نتایج یک بررسی تحلیلی و تجربی پانل‌های ساندویچی بتنی پیش‌ساخته را که به عنوان دال یک‌طرفه عمل می‌کنند تحت بار خمشی ارائه می‌کند.

۱- رفتار پانل‌های ساندویچی آزمایش شده به یک عملکرد کاملا مرکب در مرحله الاستیک و یک عملکرد نیمه مرکب در مرحله پلاستیک با اتصالات برشی فولادی دست یافتند.

۲- شکست در بار نهایی با خرد شدن (Crushing) بتن در پانل‌های دو لایه‌ای در محل اعمال بار و در پانل‌های سه لایه‌ای در وسط دهانه میانی اتفاق افتاد.

۳- پانل ساندویچی بتنی پیش‌ساخته با دو لایه بتن مسلح (لایه تحتانی بتن سبک) دارای ظرفیت باربری و سختی کمتری نسبت به پانل با سه لایه بتن بود.

۴- وقتی که پانل‌های ساندویچی پیش‌ساخته به عنوان دال یک طرفه رفتار می‌کنند، قراردادن اتصالات برشی موازی محور X (بعد بزرگتر) برای همبستگی دولایه بتنی به منظور عمل کردن آنها به عنوان یک واحد کافی است.

۵- در آزمایش تجربی، اولین ترک‌های خمشی تقریباً در بارهای ۳۹/۷ و ۳۹ درصد بار نهایی شکست، به ترتیب برای پانل‌های P1 و P2 بدست آمد.

۶- نتایج تجربی و تحلیل المان محدود، از لحاظ الگوی ترک خوردگی، منحنی بار- تغییر مکان و تعداد لایه‌های پانل ساندویچی مقایسه شدند، همبستگی خوبی بین نتایج دیده شد. بنابراین، مدل عددی می‌تواند با اطمینان مورد استفاده قرار گیرد.

۷- مقاومت نهایی و میزان عملکرد مرکب پانل‌های ساندویچی به سختی و ترتیب قرار گرفتن اتصال دهنده‌های برشی بستگی دارد.

۸- پانل‌های ساندویچی به دلیل تولید به صورت پیش‌ساخته، کنترل کیفیت آنها آسانتر و اجرای آن ساده می‌باشد. که باعث کاهش هزینه، امکان تولید به صورت انبوه، بالا رفتن سرعت حمل و نقل و سهولت اجرای ساختمان به خصوص در ارتفاع و مناطق صعب العبور می‌شود.

۹- دال ساندویچی پیش‌ساخته بارویه‌های بتن مقاوم و هسته بتن سبک جایگزین مناسب برای سیستم دال بتنی معمولی در ساختمان می‌باشد.

۸- مراجع

[1] Einea, A. Salmon, D. Tadros, M. and Culp, T. (1994). A new structurally and thermally efficient precast sandwich panel system. PCI, Journal, July-August 1994, 90-101.

- [11] Hamid, Kazem. William G. Bunn, Hatem M. Seliem, Sami H. Rizkalla, Harry Gleich. (2015). Durability and long-term behavior of FRP/foam shear transfer mechanism for concrete sandwich panels. *Journal of Construction and Building Materials* 98 (2015) 722–734.
- [12] J, Daniel Ronald Joseph. J, Prabakar. P, Alagusundaramoorthy. (2016). Flexural behaviour of precast concrete sandwich panels under different loading conditions such as punching and bending. *Journal of Alexandria Engineering*.
- [13] Mugahed, Amran, Y. H. Raizal, S.M. Rashid, Farzad Hejazi, Nor Azizi Safiee, A. A. Abang Ali. (2016). Response of precast foamed concrete sandwich panels to flexural loading. *Journal of Building Engineering*, 7 (2016) 143–158.
- [14] Mugahed, Amran. Y.H. Raizal, S.M. Rashid, Farzad Hejazi, Nor Azizi Safiee, A. A. Abang Ali. (2016). Structural behavior flaterally loaded precast foamed concrete sandwich panels, *Int. J. Civ. Environ. Struct. Constr. Arch. Eng.* 10(3).
- [15]. Karthik Ram Ramakrishnan and et al, (201۶). Experimental study of the medium velocity impact response of sandwich panels with different cores. *Journal of Materials and Design* 99 (2016) 68–82.
- [16] Thomas, G. Norris, A. Chen. (2016). Development of insulated FRP-confined Precast Concrete Sandwichpanel with side and top confining plates and dry bond. *Journal of Composite Structures* 152 444-454.
- [17] Paul M, Hopkins. A. Chen. Mostafa, Yossef. (2017). Static and dynamic analyses of insulated concrete sandwich panels using a unified non-linear finite element model. *Journal of Engineering Structures* 132 (2017) 249–259.
- [18] J. Daniel Ronald Joseph, J. Prabakar, P. Alagusundaramoorthy (2018). Flexural behavior of precast concrete sandwich panels under different loading conditions such as punching and bending. *Journal of Alexandria Engineering Journal* (2018) 57, 309–320.
- [19] Wonchang Choi, Seok-Joon Jang, Hyun-Do Yun, (2019). Design properties of insulated precast concrete sandwich panels with composite shear
- [2] Benayoune, A. samad, A. A. A. Abang Ali, A. A. and trikha, D. N. (2007). Response of pre-cast reinforced composite sandwich panels to axial loading. *Journal of Construction and building materials*, page 677-685.
- [3] Benayoune, A. Abang Ali, A. Abdul samad, A. And trikha, D. (2007). Flexural analysis of composite one-and two-way sandwich slabs with truss-shaped connectors. *Journal, The Institution of Engineers, Malaysia* vol. 68, No.1 March 2007.
- [4] Benayoune, A. Abdul samad, A. A. Trikha, D. N. Abang Ali, A.A., and Elianna, s. H. M. (2008). Flexural behavior of pre- cast concrete sandwich composite Panel-Experimental and theoretical investigations. *science direct. Journal of Construction and Building Materials*, page 580-592.
- [5] Schumann, E. (2008). Hybrid FRP-lightweight concrete sandwich system for Engineering structures. Thesis, Dipl. Lag. Vniversitat Karlsruhe Allemagne et De Nationalite Allemande.
- [6] Schumann, E. vallee, T. and Keller, T. (2008). Direct load transfer of hybrid FRP-concrete sandwich structure for bridge decks. *Fourth International Composites in Civil Engineering. CICE2008. 22-24 July, Zurich, Switzerland.*
- [7] Schumann, E. Vallee, T. and Keller, T. (2008). Direct load transmission in sandwich slabs with lightweight concrete core. *Taylor Made Concrete Structures-Walraven & Stoelhorst (eds) 2008 Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-0-415-47535-8.*
- [8] Ahmad, I. Mohamad, N. (2011). Structural behavior of precast lightweight concrete sandwich panel under Eccentric Load: An over view. *University Tun Hussein Onn Malaysia.*
- [9] Mohammed Hussin, A. D. (2013). Structural Behavior of Composite Sandwich Slab Panels. *Journal of Engineering and Development, Vol. 17, No.4, October 2013, ISSN 1833-7822.*
- [10] Noridah, Mohammad. A. I. Khalil, A. A. Abdul Samad, and W.I. Goh. (2014). Structural behavior of Precast Light-Weight Foam Concrete Sandwich Panel with Double Shear Truss Connectors under Flexural Load. *Hindawi Publishing corporation ISRN Civil Engineering Volume 2014,7 Pages.*

Insulated Precast Concrete Sandwich Panels. *International Journal of Concrete Structures and Materials*.(2021)15:41.

<https://doi.org/10.1186/s40069-021-00477-6>.

[22] ABAQUS, Finite Element Program Theory Manual (version 2021HF3). Hibbit, Karlsson & Sorenson Inc. USA,1993.

connectors. *Journal of Composites Part B* 157 (2019) 36–42.

[20] Richard 'Hegarty, Aidan Reilly, Roger West, Oliver Kinnane (20۲۰). Thermal investigation of thin precast concrete sandwich panels. *Journal of Building Engineering* 27 (20۲۰) 100937

[21] Sani Mohammed Bida, Farah Nora Aznieta Abdul Aziz, Mohd Saleh Jaafar, Farzad Hejazi and Nabilah Abu Bakar, (2021). Thermal Resistance of

Structural behavior of the precast concrete sandwich panels with truss-shaped shear connectors under lateral loads

A.Ahmadi¹, A. Torabi^{2*}, A.Totonchi³, D. Safari⁴

1-Ph.D. candidate, in Structural Engineering, Department of Civil Engineering. Marvdasht branch, Islamic Azad University, Marvdasht, Iran.

2*-Assistant Professor, Department of Civil Engineering. Marvdasht branch, Islamic Azad University, Marvdasht, Iran.

3-Assistant Professor, Department of Civil Engineering. Marvdasht branch, Islamic Azad University, Marvdasht, Iran.

4-Assistant Professor, Department of Civil Engineering. Shiraz branch, Islamic Azad University, Shiraz, Iran

Ashkan.torabi@miau.ac.ir

Abstract

Construction of buildings using non-industrial traditional systems have lots of shortcoming in both quality and quantity. During recent years considerable needs to increase the efficiency in building sector has indicated the fact that using old building construction systems is not responsive to community needs and using superior technology in this field is quite inevitable. Constructing building systems with potential, for industrial and prefabricated production, can meet the quantitative and qualitative needs of the construction industry.

In this paper, the structural behavior of precast concrete sandwich panels (PCSPs) to feasibility of their usage as slab elements in the construction industry is experimental (EXP) and numerical analyses studied. These panels consist of three layers: 1) a regular reinforced concrete layer as the upper face, 2) a thick lightweight concrete (LC) layer as the core, and 3) a normal concrete and tension-resistant reinforced lightweight concrete layer as the bottom face. These layers are joined via a rebar network with truss-shaped shear connectors. The structural behavior of precast concrete sandwich panels under flexure is studied. For this purpose, First, laboratory samples were made and tested for bending. Subsequently, a finite element analysis (FEA) was performed on a sandwich panel model with the specifications and mechanical properties similar to the EXP model in the ABAQUS software. Comparing the results of the experimental and numerical studies revealed a good level of accuracy. The effect and orientation of the shear connectors in one or two directions were also investigated. The results of experimental and numerical investigation, show a logical behaviour of load-deflection curves According to the results, the PCSPs with two concrete layers had a smaller stiffness and load capacity than those with three concrete layers, When the prefabricated sandwich panels behave as one-way slabs, placing shear connectors parallel to the x-axis (larger dimension) is sufficient to bond two concrete layers for them to act as a single unit, and the ultimate strength and the composite action of desired were found to depend to a large extent upon the stiffness of the shear connector used. This sandwich panel system can constitute an effective step toward lightening regarding its high bearing capacity and ductility, industrial manufacturing capability, prefabricated nature, multi-layer nature, high quality, lightweight, high construction speed, and reduced costs. Hence, the precast concrete sandwich panels slabs with high-strength faces and LC cores can be a suitable replacement for regular slab systems in buildings Based on the economic and weight comparisons under the code dead and live loads, the proposed prefabricated sandwich composite slab system is approximately 20 percent lighter than the regular slab. Due to possibility of industrial production of precast sandwich panels under standard conditions and simplicity of construction, the introduced novel panels system can be a viable alternative for common floor systems. Besides, the novel system can save amount of material, labor, time, and cost in building construction. This research aims to investigate the composite performance and influential parameters in bearing capacity and improve and develop hybrid concrete sandwich panels for structural purposes to lighten and industrialize construction, a topic of interest in structural engineering.

Keywords: Experimental (EXP), Model element analysis (FEM), lightweight concrete (LC), precast concrete sandwich panels (PCSPs), Shear connectors