Iranian Concrete Society

Investigation of Structural Behaviour of Concrete Composite Sandwich Panels-Type Flooring Made up of Resisting Facings and lightweight Concrete Core

Allah dad Ahmadi[1], Babak mansori[2*]

1-Instructor, Department of Civil Engineering. Firoozabad branch, Meymand center, Islamic Azad University, Meymand, Iran. babak.mansoori@iau.ac.ir
2-Assistant Professor, Department of Civil Engineering. Firoozabad branch, Meymand center, Islamic Azad University, Meymand, Iran.
***Received**: 08 August 2023* ***Revised**: 03 November 2023* ***Accepted**: 18 December 2023*
Research paper

ABSTRACT

In this paper a new system of precast concrete sandwich panels (PCSP) is introduced. Finite element analyses (FEA) were carried out to study the behavior of composite precast concrete sandwich panels (PCSP) in order to examine feasibility of their usage as slab elements in the construction industry. The panels are composed of three layers; an ordinary reinforced concrete or fiber-reinforced concrete as top layer' a thick layer of light-weight concrete as a middle layer or core and the third layer or lowest layer is a tensile resistant reinforced concrete or reinforced light-weight concrete. In this research, the structural behavior of precast concrete sandwich panels (PCSP) under flexure is studied. For this purpose, at first four model of one-way sandwich panels with the ABAQUS software were modeled and in terms of structural performance have been studied. The effect of steel shear connector's stiffness as measured by its diameter on the ultimate strength and composite action of the panels was investigated. In addition, the effect and orientation of the shear connectors in one or two directions were also investigated. According to the results, the sandwich panels with two concrete layers had a smaller linear region stiffness 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 to act as a single unit. The ultimate strength and the desired composite action were found to depend to a large extent upon the stiffness of the shear connector.

Keywords:Composite, lightweight Concrete, Fiber Concrete, Precast Concrete Sandwich Panel, Shear Connectors.

***Corresponding Auther**: Babak Mansouri
Mansoori, B., ahmadi, A. Investigation of the Structural Behaviour of the Concrete Composite Sandwich Panels-Type Flooring Made up of Resisting Facings and lightweight Concrete core. Journal of Concrete Structures and Materials, 2023; 8(2): 1-17. http://doi.org/10.30478/jcsm.2023.410673.1342
2538-5828/ © 2023 The Authors. Published by Iranian Concrete Society
This is an open access article under the CC BY license (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

انجمن علمی بتن ایران

بررسی رفتار سازه‌ای پانل‌های ساندویچی بتنی سقفی با رویه‌های مقاوم و هسته بتن سبک

الله داد احمدی[1]، بابک منصوری[2*]

۱ - مربی گروه مهندسی عمران، واحد فیروزآباد، مرکز میمند، دانشگاه آزاد اسلامی، میمند، ایران.

۲- استاد یار گروه مهندسی عمران ، واحد فیروزآباد، مرکز میمند، دانشگاه آزاد اسلامی، میمند، ایران.

پست الکترونیکی نویسنده مسئول : babak.mansoori@iau.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۵/۱۷، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۸/۱۲، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۰/۰۵

نوع مقاله: پژوهشی

چکیده

در این مقاله سیستم پانل ساندویچی پیش‌ساخته جدید معرفی شده است. تحلیل اجزاء محدود پانل‌های ساندویچی بتنی پیش‌ساخته کامپوزیت جهت امکان استفاده آن‌ها در ساخت‌وسازه‌ای صنعتی مطالعه شده است. این پانل‌ها متشکل از سه‌لایه می‌باشند لایه‌ها عبارتنداز: یک لایه بتن مسلح معمولی یا بتن الیافی به‌عنوان لایه فوقانی یک لایه ضخیم از بتن سبک به‌عنوان لایه میانی یا هسته و یک لایه بتن معمولی یا بتن سبک مسلح مقاوم در مقابل کشش به‌عنوان لایه تحتانی. رفتار سازه‌ای پانل‌های ساندویچی پیش‌ساخته تحت خمش بررسی شده است. برای این منظور ابتدا چهار مدل پانل ساندویچی یک‌طرفه در نرم‌افزار ABAQUS مدل‌سازی شده و از لحاظ عملکرد سازه‌ای مورد بررسی قرار گرفته‌اند. تاثیر سختی اتصال‌دهنده‌های برشی که با توجه به قطر آن‌ها اندازه‌گیری می‌شود بر روی مقاومت نهایی و عملکرد مرکب پانل‌های ساندویچی بررسی شده است. همچنین تاثیر جهت‌گیری اتصالات برشی در یک و دو جهت نیز مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان داد پانل‌های ساندویچی با دو لایه بتن نسبت به پانل‌های ساندویچی سه‌لای‌های دارای سختی کمتری در ناحیه خطی می‌باشند همچنین وقتی که پانل‌های ساندویچی پیش‌ساخته به‌عنوان دال یک‌طرفه رفتار می‌کنند قراردادن اتصالات برشی موازی محور x (بعد بزرگتر) برای هم‌بستگی لایه‌های بتنی به‌منظور عمل کردن آن‌ها به‌عنوان یک واحد کافی است. مقاومت نهایی و عملکرد کامپوزیت پانل‌های ساندویچی به سختی اتصالات برشی بستگی دارند.

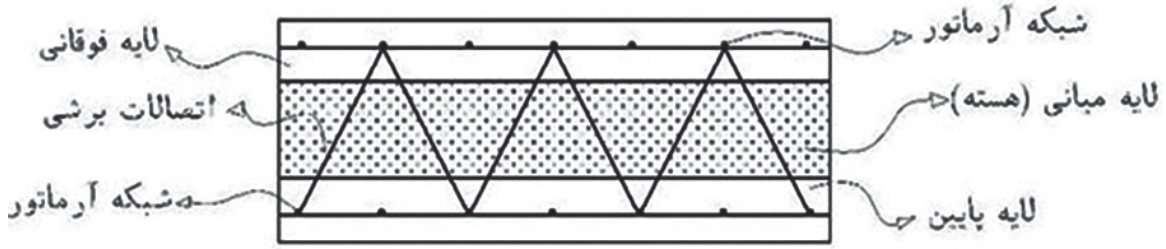
کلمات کلیدی: بتن سبک بتن الیافی پانل ساندویچی بتنی پیش‌ساخته کامپوزیت اتصالات برشی

۱- مقدمه و تاریخچه تحقیقات

یکی از روش‌های صنعتی ساخت‌وساز جهت سبک‌سازی ساختمان‌ها و صرفه‌جویی در مصالح که در چند دهه اخیر در رشته مهندسی ساختمان مورد توجه قرار گرفته است استفاده از صفحات ساندویچی می‌باشد. پیشرفت‌ها و تحولات زیادی در سبک‌سازی دیواره‌ها سقف‌ها بدنه هواپیماها عرشه کشتی‌ها و پل‌ها در سال‌های گذشته با استفاده از صفحات ساندویچی انجام گرفته که این تحولات در صنعت ساختمان‌سازی مخصوصا در رشته مهندسی سازه و زلزله مورد بهره برداری قرار می‌گیرند. در سال‌های اخیر با توجه به پیشرفت‌های علمی‌پژوهشی در سطح جهانی وزن هر متر مربع سقف ساختمان‌ها یعنی بار مرده آن کاهش یافته و باعث کاهش شتاب پایه و نیروهای واژگونی وارد به سازه ساختمان‌ها و سبک‌سازی آن‌ها در اثر زلزله گردیده است با توجه به حجم ساختمانهایی که در سال‌های آینده قرار است ساخته شود در صورت به‌دست‌آمدن طرح‌های مناسب اقتصادی و بهینه که از لحاظ مقاومت در مقابل نیروهای وارد به سازه قدم بزرگی در راه صرفه‌جویی مصالح نیروی کار و منابع ملی خواهد بود.

ساختار سازه‌های ساندویچی عموما از رویه بالایی هسته و رویه پایینی تشکیل می‌شود. سفتی هسته در راستای عمود بر رویه‌ها باید به اندازه‌ای باشد که بتواند رویه‌ها 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 رویه‌ها نسبت به یکدیگر لغزش نداشته باشد. در غیر این صورت خاصیت ساندویچ بودن از بین میرود و رویه‌ها مانند تیر یا ورق‌های مجزا عمل می‌کنند.

پانل‌های ساندویچی پیش‌ساخته بتنی با اتصال‌دهنده‌های برشی همان‌گونه که در شکل ۱ نشان داده شده است از رویه‌های بتنی مقاوم و هسته 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 به‌عواملی مانند: عملکرد کامپوزیتی مطلوب بار اعمال شده دهانه پانل و نوع اتصالات برشی بستگی دارد.



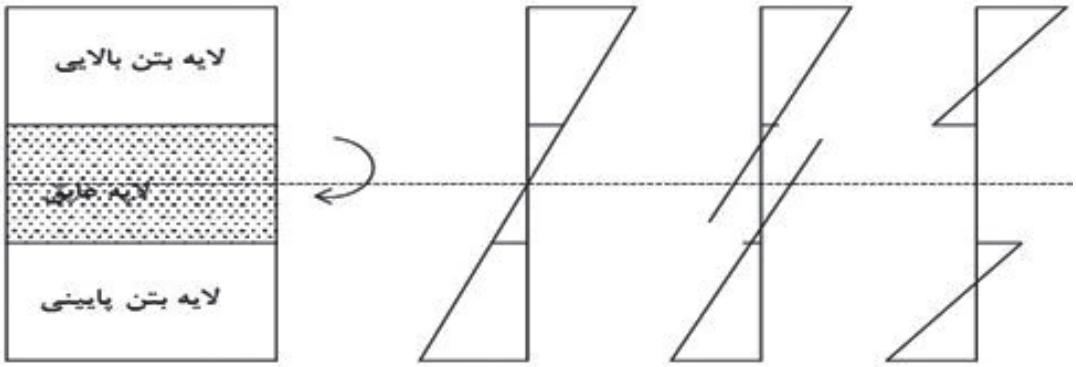
شکل ۱: مقطعی از پانل‌های ساندویچی با اتصالات برشی خرپایی شکل

نسبت به درجهی عملکرد کامپوزیت به‌دست آمده یک پانل ساندویچی بتنی پیش‌ساخته ممکن است به‌عنوان یک پانل کاملا کامپوزیت نیمه کامپوزیت یا غیر کامپوزیت در نظر گرفته شود.

کاملا کامپوزیت: در این پانل دو صفحه بتنی به صورت یک واحد یکسان و با هم در برابر بارهای اعمال شده تا لحظه شکست عمل می‌کنند. پانل کاملا کامپوزیت با شکسته شدن بتن و یا جاری شدن آرماتورهای طولی لایهی بتن مسلح بدون گسیختگی اتصال‌دهنده‌های برشی گسیخته می‌شود (شکل۲- الف).

پانل نیمه کامپوزیت: در پانل‌های نیمه کامپوزیت اتصال‌دهنده‌های برشی فقط بخشی از کل برش طولی را که در حالت کاملا کامپوزیت منتقل می‌شود را انتقال میدهند. در این نوع پانل اتصال‌دهنده‌های برشی قبل از شکسته شدن بتن و یا جاری شدن فولادهای طولی گسیخته می‌شوند(شکل۲- ب).

پانل غیرکامپوزیت: اگر اتصال‌دهنده‌های برشی که دو لایهی بتن مسلح را به یکدیگر متصل می‌کنند ظرفیت تحمل انتقال کامل برش طولی را نداشته باشد عملکرد مستقل لایه ی بتنی باعث می‌شود پانل به صورت غیر مرکب عمل کند(شکل۲- ج).



الف)کاملا کامپوزیت **ب)نیمه کامپوزیت** **ج)غیر کامپوزیت**

شکل۲: توزیع کرنش در پانل تحت خمش [۱۹].

در چند دهه اخیر تحقیقات زیادی در مورد پانل‌های ساندویچی پیش‌ساخته انجام شده است. اولین بار در سال ۱۹۶۷ میلادی سیستم پانل‌های پیش‌ساخته ساندویچی تری‌دی[1] توسط شخصی به نام ویکتور وایزمن در ایالت کالیفرنیای آمریکا به ثبت رسید و تحت عنوان پانل‌های ساندویچی به روش بتن پاشی در پای کار(شاتکریت) به بازار جهانی معرفی شد و در صنعت ساختمان مورد استفاده قرار گرفت. در میان پژوهش‌های انجام شده ؛ سانی محمد و همکاران در سال۲۰۲۱ مقاومت حرارتی پانل‌های ساندویچی با رویه‌های بتنی و هسته پلی‌استایرن را به‌صورت تجربی و عددی مورد مطالعه قرار دادند[۱]. ریچارد و همکارانش در سال۲۰۲۰ عملکرد حرارتی پانل‌های ساندویچی سبک وزن با دو لایه خارجی بتنی و لایه میانی (هسته) فوم را با استفاده از دستگاه صفحه داغ به‌صورت تجربی مورد بررسی قرار دادند[۲]. ونچانگ و همکارانش در سال ۲۰۱۹ مکانیسم انتقال برش را در پانل‌های ساندویچی با دو لایه عایق و سه‌لایه بتن با اتصالات برشی پلیمری تقویت شده با الیاف شیش‌های (GFRP) را مورد بررسی قرار دادند[۳]. دانیل و همکاران در سال۲۰۱۸ رفتار خمشی پانل‌های ساندویچی بتنی پیش‌ساخته تحت بارهای متفاوت و برش پانچینگ را با آزمایش تجربی بررسی کردند[۴]. یوسف و همکارانش در سال ۲۰۱۷ آنالیز استاتیکی و دینامیکی پانل‌های ساندویچی شامل دولایه لایه خارجی بتنی و لایه میانی پلی‌استایرن با اتصالات برشی FRP[2] که دو لایه بتنی بالا و پایین را به هم متصل می‌کردند را با استفاده از مدل المان محدود غیرخطی مورد بررسی قرار دادند[۵]. توماس و چن در سال ۲۰۱۶ پانل‌های ساندویچی شامل دولایه بتن رویه و هسته فوم[3] با اتصالات برشی FRP را مورد بررسی قرار دادند[۶]. کارتیک راماکریشنان و همکارانش در سال۲۰۱۶ به‌صورت تجربی پاسخ سرعت متوسط ضربه را روی پانل‌های ساندویچی با هسته‌های مختلف مطالعه کردند [۷]. آمران و همکارانش در سال۲۰۱۶ رفتار سازه‌ای پانل‌های ساندویچی فوم بتن را تحت بارگذاری خمشی مورد بررسی قرار دادند[۸و۹]. جوزف در سال ۲۰۱۶ رفتار خمشی پانل‌های ساندویچ بتنی پیش‌ساخته با دولایه خارجی بتن مسلح و لایه میانی پلی‌استایرن با اتصالات برشی فولادی را تحت شرایط بارگذاری مختلف مورد مطالعه قرار دادند[۱۰].

---

[1] panel 3D sandwich

[2] Fiber-Reinforced Polymer)FRP)

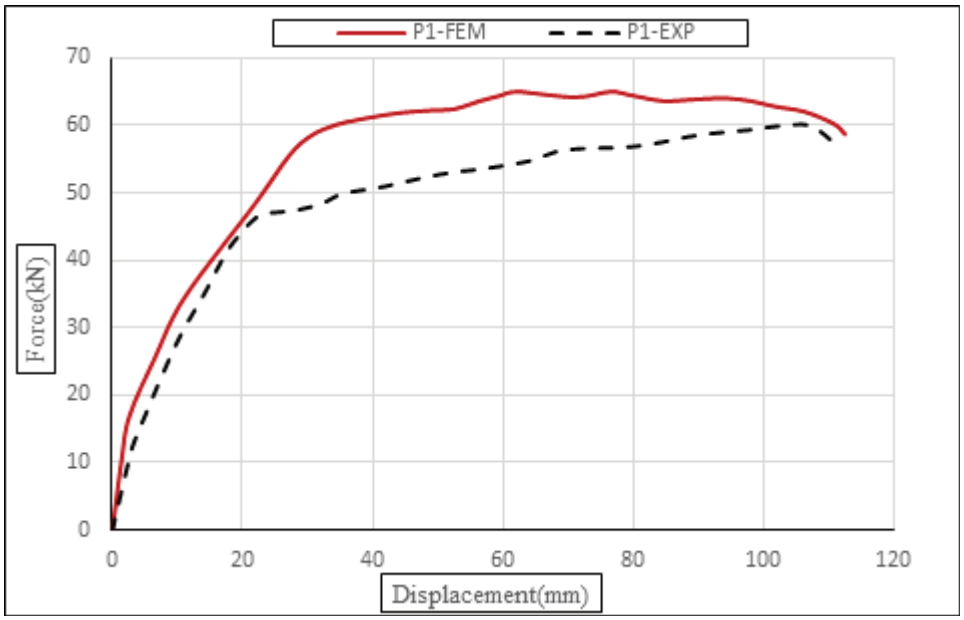
[3] foam core

کاظم و همکارانش در سال۲۰۱۵ مکانیزم انتقال برش FRP و فوم را برای استفاده در پانل‌های ساندویچی بتنی مورد بررسی قرار دادند [۱۱]. 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[۱۲]. علی داوود در سال ۲۰۱۳ رفتار سازه‌ای پانل‌های دال ساندویچی مرکب را بررسی کرد[۱۳]. احمد و محمود درسال۲۰۱۱ رفتار سازه‌ای پانل‌های ساندویچی بتنی پیش‌ساخته سبک را از نظر زیست محیطی و هم از نظر سازه‌ای و گرمایشی بررسی کردند[۱۴]. شومن و همکارانش درسال۲۰۰۸ سیستم ساندویچی بتن سبک FRP هیبریدی را جهت بهبود سیستم دال ساندویچی پیش‌ساخته مورد بررسی قرار دادند [۱۵- ۱۶-۱۷]. بنایون و همکارانش درسال ۲۰۰۷ و ۲۰۰۸ظرفیت مقاومت محوری (بار محوری) و رفتار سازه‌ای پانل‌های ساندویچی پیش‌ساخته بتنی را بررسی کردند [۱۸- ۱۹-۲۰]. اینیا و همکارانش درسال ۱۹۹۴ یک سیستم پانل ساندویچی بتن پیش‌ساخته با یک مقاومت حرارتی بالا و کارایی سازه‌ای بهینه را مورد بررسی قرار دادند[۲۱].

با توجه به تحقیقات گذشته مطالعات محدودی بر روی پانل‌های ساندویچی سقفی بتنی انجام شده است. همچنین در اکثر پانل‌های ساندویچی مطالعه شده در لایه میانی از ورق پلی‌استایرن استفاده شده است که با توجه به ترکیبات شیمیایی خاص پلی‌استایرن محبوس شدن آن بین دو لایه بتن فوقانی و تحتانی ممکن است باعث آتش سوزی و خطرات جبران ناپذیری گردد. در این تحقیق رفتار سازه‌ای پانل‌های ساندویچی پیش‌ساخته با رویه‌های بتنی مقاوم و هسته بتن سبک با اتصالات برشی تحت خمش بررسی شده است. جنبه نوآوری این تحقیق؛ استفاده بتن سبک با پوکه صنعتی لیکا در لایه میانی و بتن الیافی می‌باشد که در لایه فوقانی الیاف فولادی دو سر قلاب جایگزین میلگرد شده است. این سیستم پانل ساندویچی با توجه به خصوصیاتی مانند قابلیت تولید صنعتی پیش‌ساخته بودن چندلای‌های بودن ارتقاء کیفیت سبک‌سازی سرعت بالا در اجرا و کاهش هزینه در ساختمان‌سازی یکی از انواع سیستم‌های صنعتی در راستای سبک‌سازی و گامی موثر در این زمینه می‌باشد. اهداف این تحقیق بررسی رفتار کامپوزیت و پارامترهای تاثیرگذار در باربری بهبود و توسعه پانل‌های بتنی ساندویچی هیبریدی برای سازه‌ها و سبک‌سازی ساختمان‌ها می‌باشد. که موضوع جالب و مطرحی در مهندسی سازه می‌باشد.

۲-روش انجام تحقیق

در این تحقیق رفتار سازه‌ای مدل‌های المان محدود پانل‌هایساندویچی بتنی با تحلیل استاتیکی غیرخطی بارافزون (پوش‌آور) جهت امکان استفاده آن‌ها به‌عنوان اجزاء دال در ساخت‌وسازه‌ای صنعتی تحت بارگذاری چهارنقطه‌ای به روش تغییرمکان کنترل بوسیله نرم‌افزار ABAQUS مورد مطالعه قرار گرفته است. جهت صحت سنجی نرم‌افزار ابتدا یک نمونه آزمایشگاهی مطابق مشخصات پانل شماره یک(P۱) در جدول یک ساخته شد و تحت آزمایش خمش قرار گرفت. سپس مطالعه تحلیلی آنالیز المان محدود پانل ساندویچی(P۱) با مشخصات و خصوصیات مکانیکی مشابه نمونه آزمایشگاهی با نرم‌افزار ABAQUS انجام شده است. نمودار تغییر شکل در وسط دهانه برای پانل P۱ در مدل‌های المان محدود و آزمایشگاهی در مراحل مختلف بارگذاری در شکل ۳ نشان داده شده است. بیشترین اختلاف بین منحنی تجربی و المان محدود ۱۸/۵درصد می‌باشد. تفاوت منحنی‌های بار- تغییر مکان به این دلیل است که مدل‌های المان محدود رفتار سختری دارند (سفت ترند) یا ناشی از خطاهای ناخواسته است که در تنظیم (کالیبره) کردن دستگاه‌های مورد استفاده در آزمایشگاه رخ داده است. به‌طور کلی تفاوت بین نتایج عددی و آزمایشگاهی در محدوده مجاز قرار دارد.



شکل۳: مقایسه بین نمودار بار -تغییر مکان مدل آزمایشگاهی و عددی

۳- مدل‌سازی و تحلیل المان محدود

در این تحقیق از نرم‌افزار ABAQUS به دلیل قابلیت‌هایی از جمله «محیط گرافیکی مناسب امکان تولید مدل‌های پیچیده دقت سهولت اعمال تغییر در مدول‌های مختلف برنامه و امکان تعریف خسارت و خروجی‌های بسیار متنوع » استفاده شده است[۲۲]. در مدل‌سازی سعی شده است که ساده سازی به حداقل برسد و مدل ساخته شده از نظر هندسی و سایر مشخصات کاملا مشابه با نمونه اصلی و قابل اجرا باشد.

با اینکه بارها از نوع استاتیکی هستند به دلیل رفتار ترد و غیرخطی مصالح تحلیل با استفاده از روش حل صریح (Explicit) انجام می‌شود که یک روش دینامیکی است و بهترین گزینه برای حل سریع مسائل دینامیکی خطی و غیرخطی و مسائل با تماس پیچیده می‌باشد. این روش دارای سرعت بالا در روش حل قدرت همگرایی بالا در بازه زمانی کوچکتر قابلیت تشخیص تماس خودکار قابلیت تحلیل ساده‌تر تغییر فرم‌های خیلی بزرگ توانایی بهتر حل مسائل دارای ناپیوستگی‌های زیاد می‌باشد. برای تعریف رفتار غیرخطی بتن از مدل رفتاری (مصالح) موجود در نرم‌افزار ABAQUS به نام Plasticity Concrete Damaged (مدل ترکیبی پلاستیک - خسارت بتن)استفاده شده است که پیچیده‌ترین و پرکاربردترین مدل رفتاری می‌باشد و توانایی شبیه‌سازی رفتار چرخه‌ای بتن را دارد. برای مدل سازی بتن از المان solid و میلگردها از المان wire استفاده شده است. شبکه میلگرد لایه فوقانی و تحتانی و میلگرد برشی اتصال دهندهی دو شبکه در مدول Assembly با استفاده از دستور Merge به هم پیوند داده شده‌اند. در تمام نمونه‌ها برای تعیین ظرفیت باربری پانل ساندویچی یک نقطه Reference Point (RF) در مرکز آن به‌منظور به‌دست آوردن حداکثر تغییر مکان وسط دهانه و امکان ترسیم نمودارهای مختلف منظور شده است. در مدول Mesh با استفاده از معادلات مرتبه دوم برای لایه بتن در تمام نمونه‌ها از المان Hex (المان مکعبی۶ 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 regionمقید شده است. برای مدل

سازی پانل‌ها تصال لایه‌های بتن با استفاده از قید زمانی surface to surface contact بین دو سطح با ضریب اصطکاک۰/۹بین لایه‌ها تعریف شده و رفتار سیستم به‌صورت Hard contact معرفی شده است.

سیستم واحدهای انتخابی در نرم‌افزار ABAQUS: طول (متر m) نیرو (نیوتن N) زمان (ثانیه s) و سایر واحدها بر مبنای این واحدها می‌باشد.

۳-۱- مشخصات مدل المان محدود

در این تحقیق با بهره‌گیری از ایده کاربرد مناسب سازه‌های هیبریدی سیستم پانل ساندویچی پیش‌ساخته جدیدی معرفی شده است. رفتار سازه‌ای پانل‌های ساندویچی بتنی پیش‌ساخته تحت خمش بررسی شده است. برای این منظور چهار نوع پانل ساندویچی بتنی پیش‌ساخته با نرم‌افزار المان محدود ABAQUS مدل‌سازی شده و از لحاظ عملکرد سازه‌ای مورد بررسی قرار گرفته‌اند. لایه‌های رویه و لایه میانی (هسته) این پانل‌ها با اتصالات برشی خرپایی شکل به یکدیگر متصل شده‌اند (شکل ۱). بتن لایه تحتانی پانل‌های ساندویچی فقط نقش پوشاننده میلگرد را دارد و دارای ضخامت حداقل می‌باشد در بعضی حالت‌ها بتن سبک لایه میانی می‌تواند همین نقش را بازی کند بنابراین بتن لایه تحتانی به دلیل اینکه خاصیتی ندارد حذف می‌شود.

تحلیل اجزاء محدود پانل‌های ساندویچی بتنی پیش‌ساخته کامپوزیت جهت امکان استفاده آن‌ها در ساخت‌وسازه‌ای صنعتی مطالعه شده است. کلیه پانل‌ها با ابعاد یکسان ۱۸۰×۷۰۰ × ۲۶۰۰ میلی‌متر مطابق جدول ۱ می‌باشند. تفاوت بین پانل‌های ساندویچی در نوع بتن لایه‌های رویه و تعداد لایه‌ها می‌باشد. پانل‌ها به گونه‌ای تهیه شده‌اند که هر کدام از پانل‌ها رفتار تقریباً کامپوزیت دارند. این پانل‌ها با نسبت بعد بزرگتر a به بعد کوچکتر b برابر ۳/۷۱ ($\frac{a}{b} = ۳.۷۱$) را می‌توان به‌عنوان دال یک‌طرفه در نظر گرفت (جدول۱).

جدول۱: مشخصات پانل‌های مورد مطالعه

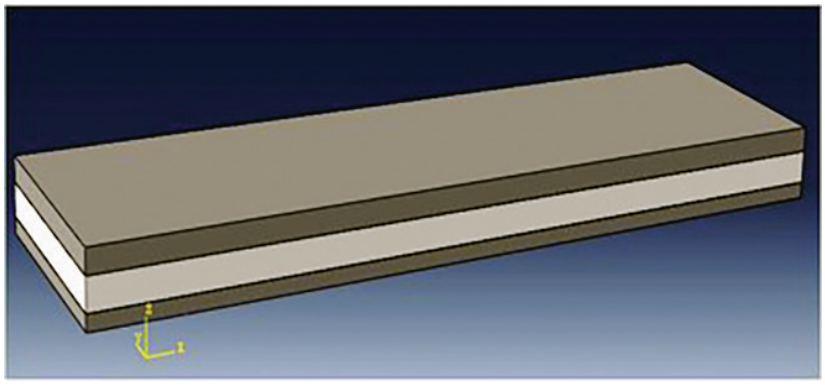
نوع پانل	نوع لایه پایین(تحتانی)	نوع لایه میانی(هسته)	نوع لایه بالا(فوقانی)	طول (mm)	عرض (mm)	ضخامت (mm)	نسبت طول/عرض
P_1	بتن مسلح سبک	بتن سبک	بتن مسلح معمولی	۲۶۰۰	۷۰۰	۱۸۰	۳/۷۱
P_2	بتن مسلح معمولی	بتن سبک	بتن مسلح معمولی	۲۶۰۰	۷۰۰	۱۸۰	۳/۷۱
P_3	بتن مسلح سبک	بتن سبک	بتن با الیاف فولادی	۲۶۰۰	۷۰۰	۱۸۰	۳/۷۱
P_4	بتن مسلح معمولی	بتن سبک	بتن با الیاف فولادی	۲۶۰۰	۷۰۰	۱۸۰	۳/۷۱

۳-۲- پانل‌های ساندویچی پیش‌ساخته مورد مطالعه

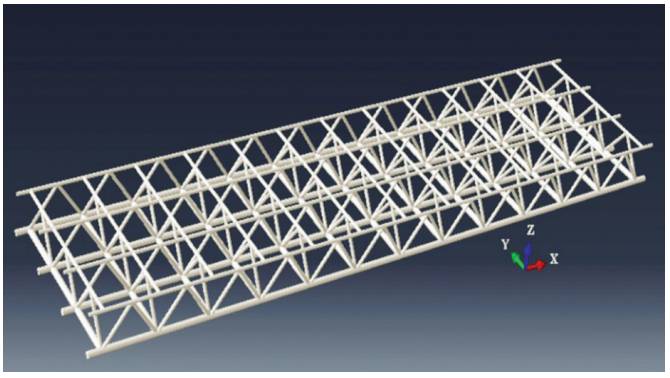
الف) پانل ساندویچی بتنی پیش‌ساخته با سه‌لایه بتن مسلح

پانل ساندویچی ($P_۲$) متشکل از سه‌لایه: یک لایه بتن مسلح پر مقاوم به‌عنوان لایه فوقانی (فشاری) به ضخامت ۶۰ میلی‌متر و شبکه میلگردهای طولی و عرضی مسلح کننده بتن به قطر ۶ میلی‌متر با چشمه ۲۰۰×۲۰۰ میلی‌متر پوشش بتنی روی میلگردها ۳۰ میلی‌متر لایه میانی شامل یک بتن سبک به ضخامت ۸۰ میلی‌متر لایه تحتانی شامل یک 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 ۲۰۰×۲۰۰ میلی‌متر

و پوشش بتنی ۳۰ میلی‌متر می‌باشد. سه‌لایه بتن با اتصال‌دهنده‌های برشی خرپایی شکل که از میلگرد به قطر ۶ میلی‌متر تشکیل شده و در فواصل ۲۰۰ میلی‌متر از یکدیگر در جهت طول و عرض قرار دارند به یکدیگر متصل شده‌اند.



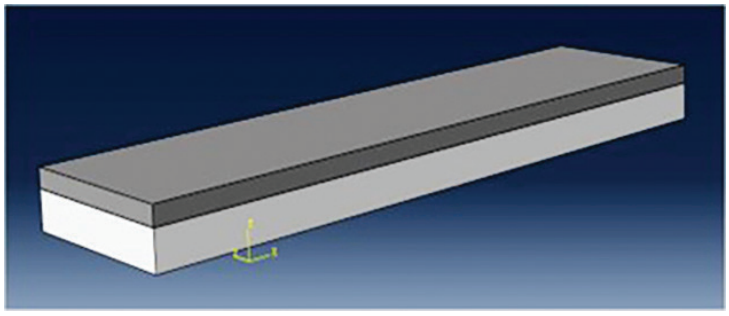
شکل۵: پانل ساندویچی متشکل از سه‌لایه بتن



شکل۶: شبکه میلگرد پانل ساندویچی متشکل از سه‌لایه بتن

ب) پانل ساندویچی بتنی پیش‌ساخته با دو لایه بتن مسلح

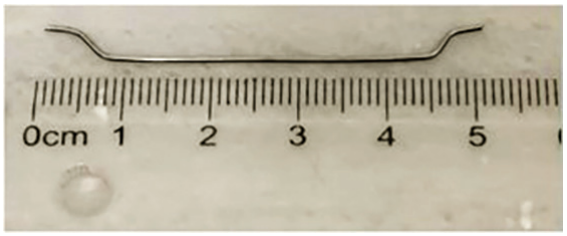
پانل ساندویچی (P ۱) شبیه حالت الف می‌باشد با این تفاوت که در این مدل بتن مقاوم لایه تحتانی را که فقط نقش پوشاننده میلگرد دارد و دارای ضخامت حداقل می‌باشد و خاصیتی ندارد را بدلیل اینکه بتن سبک لایه میانی می‌تواند همین نقش را بازی کند حذف و از بتن سبک لایه میانی استفاده شده است.



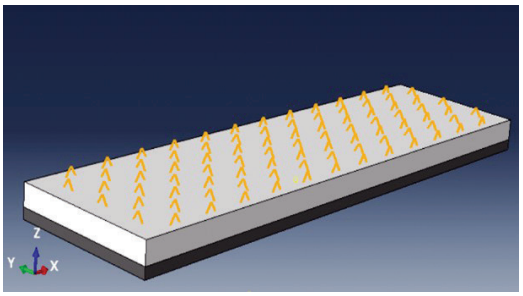
شکل۷: پانل ساندویچی بتنی پیش‌ساخته با دو لایه بتن

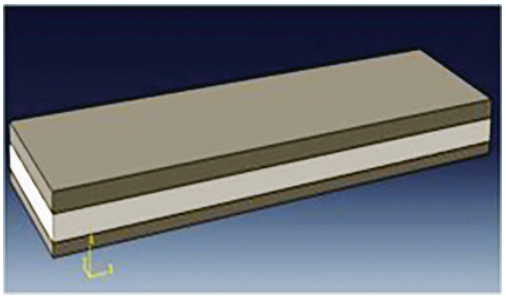
ج) پانل ساندویچی بتنی پیش‌ساخته با دو لایه بتن مسلح و یک لایه بتن الیافی

پانل ساندویچی (P_3) شبیه حالت الف می‌باشد با این تفاوت که درلایه فوقانی از بتن الیافی استفاده شده است و الیاف فولادی دو سر قلاب (شکل۸) جایگزین شبکه میلگرد شده است. برآمدگی اتصالات برشی در بتن الیافی لایه فوقانی نقش برشگیر را در پانل‌های کامپوزیت ایفا کرده و از لغزش لایه فوقانی نسبت به لایه میانی جلوگیری می‌کند(شکل۱۰).

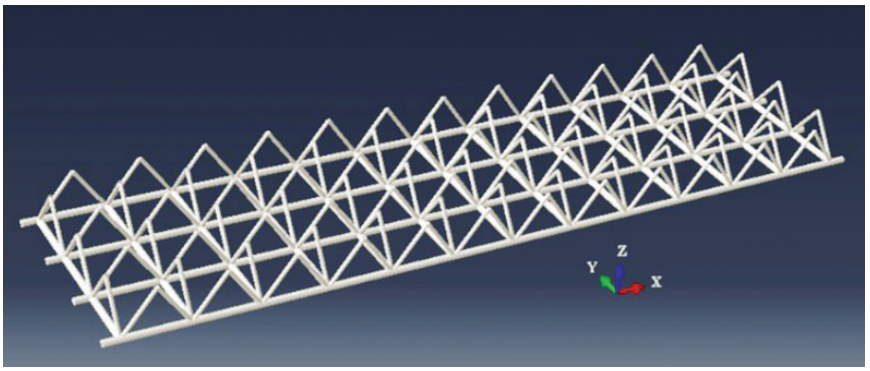


شکل۸: الیاف فولادی





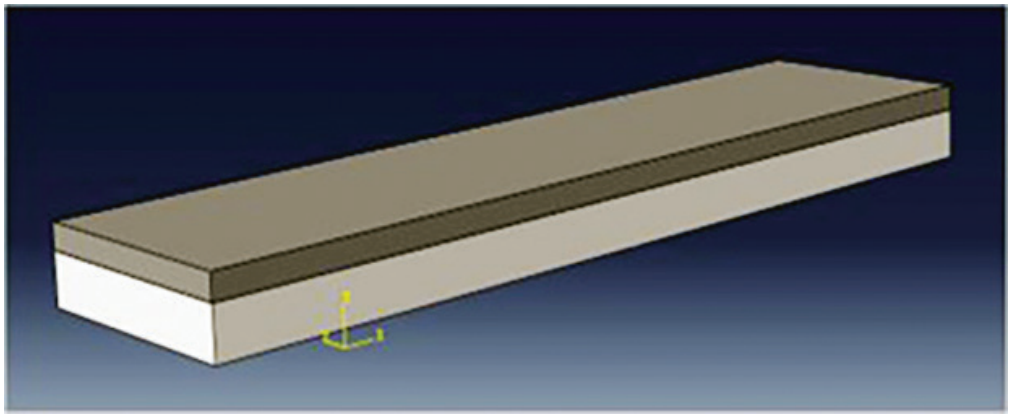
شکل۹: پانل ساندویچی با دو لایه بتن مسلح ویک لایه بتن الیافی شکل۱۰: اتصالات برشی در بتن الیافی لایه فوقانی



شکل۱۱: شبکه میلگرد پانل ساندویچی بدون میلگرد فوقانی

د) پانل ساندویچی بتنی پیش‌ساخته با یک لایه بتن مسلح و یک لایه بتن الیافی

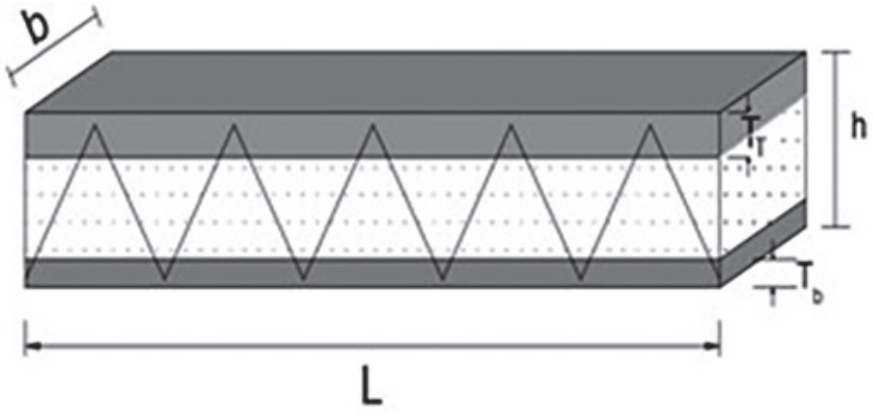
پانل ساندویچی(P_4) شبیه حالت ج می‌باشد با این تفاوت که دراین مدل بتن مقاوم لایه تحتانی را که فقط نقش پوشاننده میلگرد دارد و دارای ضخامت حداقل می‌باشد و خاصیتی ندارد را بدلیل اینکه بتن سبک لایه میانی می‌تواند همین نقش را بازی کند حذف و از بتن سبک لایه میانی استفاده شده است.



شکل۱۲: پانل ساندویچی با یک لایه بتن مسلح ویک لایه بتن الیافی

۳-۲-۱- اعضاء پانل‌های ساندویچی پیش‌ساخته

پانل‌های ساندویچی پیش‌ساخته با اتصال‌دهنده‌های برشی همان‌گونه که در شکل ۱۳ نشان داده شده است از رویه‌های مقاوم و بتن سبک به‌عنوان هسته تشکیل شده است که به وسیله اتصال‌دهنده‌های برشی به یکدیگر متصل شده‌اند. ترتیب و فواصل اتصالات برشی در پانل‌های ساندویچی بتن پیش‌ساخته به‌عواملی مانند: عملکرد کامپوزیتی مطلوب بار اعمال شده دهانه پانل و نوع اتصالات برشی بستگی دارد.



شکل۱۳: مقطعی از پانل ساندویچی

الف) لایه فوقانی: در این لایه در دو پانل از بتن مسلح معمولی و در دو پانل دیگر از بتن الیافی با مشخصات مکانیکی مطابق جدول۲ استفاده شده است. بتن مسلح معمولی دارای فولاد حداقل بوده و به میزان میلگرد حرارتی دال بتنی محدود می‌شود(جدول۳).

بتن الیافی حاوی الیاف فولادی دو سر قلاب می‌باشد که الیاف فولادی مطابق استاندارد wire Type I Cold-drawn- A820 ASTM با مشخصات جدول ۴ استفاده شده است.

جدول ۲: مشخصات مکانیکی نمونه استوانه ای بتن لایه فوقانی

نوع بتن	چگالی (کیلوگرم بر متر مکعب)	مقاومت فشاری (کیلوگرم برسانتی‌مترمربع)	مقاومت کششی(برزیلی) (کیلوگرم برسانتی‌مترمربع)
بتن معمولی	۲۳۰۳	۳۶۷	۴۷
بتن الیافی	۲۳۳۷	۴۴۵	۶۲

جدول۳: مشخصات مکانیکی میلگرد لایه فوقانی

قطراسمی میلگرد	چگالی (کیلوگرم بر متر مکعب)	**تنش تسلیم(f_y) (مگا پاسکال)**	**تنش گسیختگی(f_u) (مگا پاسکال)**
۶	۷۹۹۰	۴۲۰	۶۲۰

جدول ۴: مشخصات الیاف فولادی

چگالی (کیلو گرم بر متر مکعب)	مقاومت کششی (مگا پاسکال)	نسبت طول به قطر	قطر (میلی‌متر)	طول (میلی‌متر)	نوع الیاف فولادی
۷۸۵۰	۱۲۰۰	۶۳/۷۵	۰/۸	۵۱	دو سر قلابدار

ب) لایه میانی (هسته): این لایه از بتن سبکدانه می‌باشد که دو کاربرد دارد: یکی دادن ارتفاع لازم جهت 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 کمانش اتصالات برشی داخل بتن که از پایه‌های مورب دو طرفه تشکیل شده‌اند جلوگیری کند و باعث گردد که این میله‌ها بتوانند حداکثر مقاومت فشاری ناشی از برش را از خود نشان دهند.

در این لایه از بتن سبک(سبکدانه) حاوی دانه‌های سبک از نوع پوکه صنعتی لیکا با مشخصات مکانیکی مطابق جدول۵ استفاده شده است. پوکه صنعتی لیکا از انبساط خاک‌رس در کوره‌های گردان با حرارتی حدود۱۲۰۰درجه سانتی‌گراد به‌دست میآیند. دانه‌های پوکه صنعتی دارای شکل تقریبا گرد و سطح زبر و ناهموارند. سطح خارجی دانه‌ها دارای خلل و فرج ریز و قهوه‌ای رنگ و بخش داخلی دانه‌ها دارای بافت سلولی سیاه رنگ است(شکل۱۴).

شکل۱۴: پوکه صنعتی لیکا

جدول ۵: مشخصات مکانیکی نمونه استوانه ای بتن لایه میانی(هسته)

نوع بتن	چگالی (کیلوگرم بر متر مکعب)	مقاومت فشاری (کیلوگرم برسانتی‌مترمربع)	مقاومت کششی(برزیلی) (کیلوگرم برسانتی‌مترمربع)
بتن سبک	۱۷۴۸	۱۴۶	۳۹

ج) اتصال‌دهنده‌های برشی: میلگردهای فشاری- کششی دو طرفه داخل بتن سبک می‌باشند که نقش آن‌ها گرفتن برش مخصوصا در دو انت‌های پانل است. نیروی برشی توسط بتن سبک و همچنین توسط اتصال‌دهنده‌های برشی مقاومت می‌شود همچنین این میلگردها باعث اتصال لایه‌های فوقانی و تحتانی گردیده و از جدایی آن‌ها بعلت ترک خوردگی بتن سبک میانی 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 تحتانی نسبت به لایه میانی جلوگیری می‌کند. مشخصات مکانیکی اتصالات برشی مانند میلگرد لایه فوقانی مطابق جدول۳ می‌باشد.

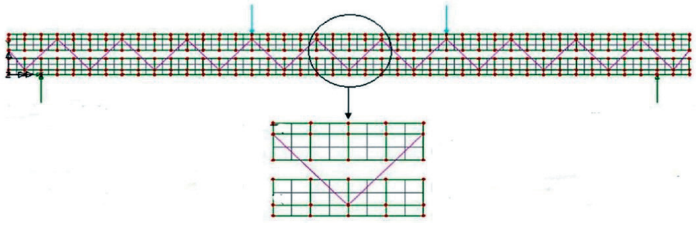
د) لایه تحتانی: در این لایه در دو پانل از بتن معمولی و در دو پانل دیگر از بتن سبک با مشخصات مکانیکی به‌ترتیب مطابق جدول ۴ و ۵ استفاده شده است که در حالت کششی ترک خواهد خورد ولی در داخل آن شبکه آرماتور با مشخصات مکانیکی مطابق جدول ۶ وجود دارد که نقش گیرنده کشش ناشی از خمش را بازی می‌کند بتن این لایه نقش پوشاننده میلگرد را از لحاظ مقاومت در مقابل زنگ زدگی و آتش سوزی دارد و دارای ضخامت حداقل می‌باشد.

جدول۶: مشخصات مکانیکی میلگرد لایه فوقانی

قطراسمی میلگرد	چگالی (کیلوگرم بر متر مکعب)	تنش تسلیم(fy) (مگا پاسکال)	تنش گسیختگی(fu) (مگا پاسکال)
۱۰	۷۴۳۶	۴۶۶	۶۹۴

۴- مدل‌سازی و تحلیل پانل‌های ساندویچی بتنی پیش‌ساخته

پانل‌های ساندویچی با عملکرد یک‌طرفه به شکل سه بعدی مدل شده‌اند. جهت شرایط مرزی؛ در یک انت‌ها تکیهگاه مفصلی و در انت‌های دیگر تکیه گاه غلتکی با فاصله ۱۰ سانتی‌متر از لبه مدل‌ها در زیر پانل در نظر گرفته شده است. بار اعمالی به پانل به صورت کنترل تغییر مکان در مرکز دال به‌دست میآید بدین ترتیب که در ۱/۳ میانی دهانه پانل بر روی سطح لایه فوقانی تغییرمکان در دو خط در عرض پانل که به فاصله ۸۰ سانتی‌متر از یکدیگر قرار دارند اعمال شده است(شکل۱۵).



شکل۱۵: مدل دو بعدی پانل ساندویچی شرایط مرزی و اعمال تغییر مکان

با توجه به اینکه فولاد و بتن به‌عنوان مصالح غیرخطی معرفی شده‌اند آنالیز غیرخطی انجام شده است. فرضیاتی که در ساخت مدل‌ها در نظر گرفته شده است عبارتنداز:

ـ هیچ لغزش نسبی بین میلگردها و بتن اتفاق نمی افتد.

ـ لغزش بین میلگردهای طولی و اتصال دهنده‌های برشی نادیده گرفته شده است.

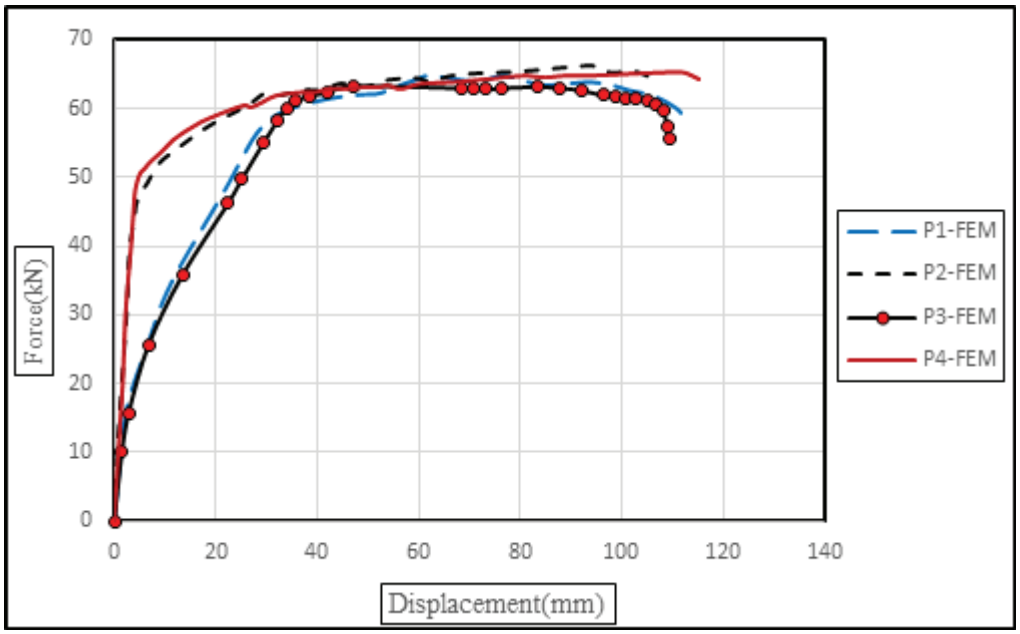
ـ فولادهای طولی و اتصال دهنده‌های برشی از یکدیگر جدا نمی‌شوند.

پانل‌های مورد بررسی در این تحقیق از نظر ابعاد و جنس اجزا تشکیل دهنده کاملا مشابه هستند. پانل‌ها تحت اعمال تغییر مکان(۱۰سانتی‌متر)در مرکز قرار می‌گیرند. نسبت‌های ظاهری پانل‌ها۳/۷۱ می‌باشد. پانل‌های ساندویچی بتنی پیش‌ساخته برای داشتن رفتار دال‌های یک‌طرفه باید نسبت‌های ظاهری بیشتر از ۲ داشته باشند.

۱- ۴- عملکرد پانل‌های ساندویچی بتنی پیش‌ساخته

رفتار سازه‌ای پانل‌های ساندویچی تحت خمش بررسی شده است. برای این منظور دو پانل دارای دو لایه بتن و دو پانل از سه‌لایه بتن تشکل شده‌اند لازم به ذکر استکلیه پانل‌های ساندویچی دارای ابعاد یکسان می‌باشند. همچنین پانل‌های ساندویچی به‌صورت دو تایی در تعداد لایه‌ها و اتصالات برشی با یکدیگر مشابه هستند و اختلاف آن‌ها در نوع بتن لایه فوقانی می‌باشد.

پس از تحلیل هر یک از مدل‌ها توسط نرم‌افزار ABAQUS منحنی‌های بار - تغییر مکان وسط دهانه پانل‌ها رسم شده است (شکل۱۶). با توجه به منحنی‌های بار - تغییرمکان پانل‌های ساندویچی یک رفتار الاستیک در مراحل اولیه بارگذاری از خود نشان دادند و در ادامه بارگذاری رفتار الاستیک به رفتار پلاستیک تغییر پیدا کرد همچنین نمودارهای بار- تغییرشکل تایید می‌کند که لایه‌های بتنی پانل‌های ساندویچی در طول مراحل بارگذاری به‌صورت کامپوزیت رفتار می‌کنند که ناشی از عملکرد مناسب اتصال دهنده‌های برشی می‌باشد.



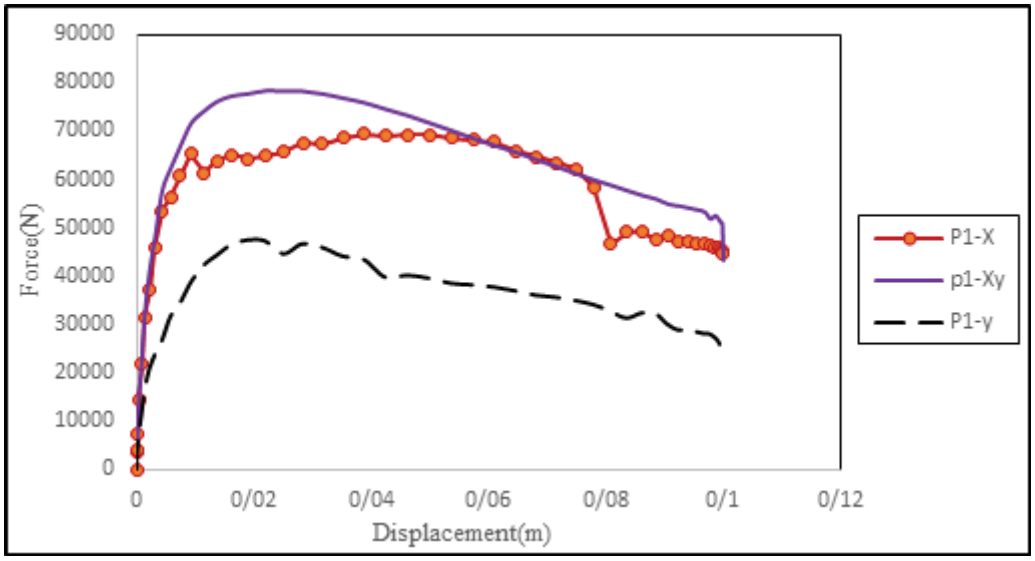
شکل۱۶: منحنی بار- تغییرمکان مدل‌های المان محدود

۴-۲- تاثیر نوع بتن وتعداد لایه‌های پانل ساندویچی

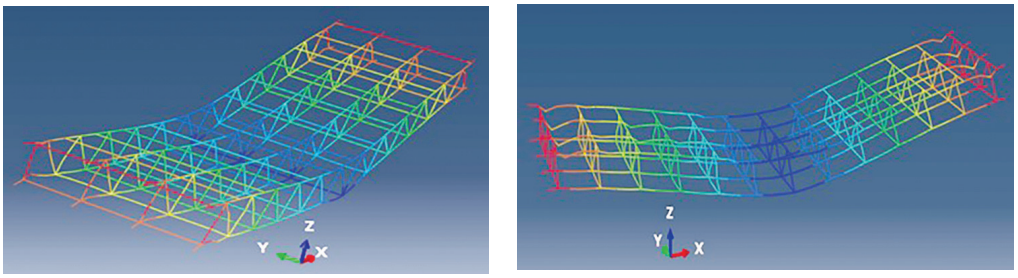
تاثیر نوع بتن و تعداد لایه‌ها بر مقاومت نهایی پانل‌های ساندویچی بررسی شده است. پانل‌های با دو لایه بتن (بتن سبک در لایه پایین) دارای سختی کمتری بخصوص در ناحیه خطی نسبت به پانل‌های با سه‌لایه بتن(بتن معمولی در لایه پایین) می‌باشند که می‌تواند بدلیل مقاومت پایین بتن سبک بخصوص در کشش باشد. همچنین نتایج نشان داد پانل‌های با لایه فوقانی بتن الیافی دارای ظرفیت باربری نسبتا بیشتر یا مساوی نسبت به پانل‌های مشابه با لایه فوقانی بتن معمولی با شبکه میلگرد می‌باشند.. بنابراین الیاف فولادی جایگزین مناسبی برای میلگرد مورد استفاده در بتن می‌باشد.

۴-۳-تاثیر جهت گیری اتصالات برشی

برای بررسی تاثیر جهت‌گیری اتصالات برشی پانل ساندویچی پیش‌ساخته بتنی با دو لایه بتن در نرم‌افزار ABAQUS مدل‌سازی و تحلیل شده است. این مدل‌ها شامل یک پانل یک‌طرفه با ابعاد ۷۰۰×۲۶۰۰ میلی‌متر ($P_{۱-۶}$) (شاخص اول نشانه یک‌طرفه بودن پانل و شاخص دوم نمره میلگرد اتصال برشی را نشان می‌دهد.) می‌باشد. این پانل متشکل از دو لایه: یک لایه بتن مسلح پر مقاوم به‌عنوان لایه فوقانی (فشاری) به ضخامت ۶۰ میلی‌متر و شبکه میلگردهای طولی و عرضی مسلح کننده بتن به قطر ۶ میلی‌متر با چشمه ۲۰۰×۲۰۰ میلی‌متر پوشش بتنی روی میلگردها ۳۰میلی‌متر لایه تحتانی شامل یک بتن سبک به ضخامت ۱۲۰ میلی‌متر و شبکه میلگردهای طولی و عرضی کششی به قطر اسمی ۱۰ میلی‌متر با چشمه ۲۰۰×۲۰۰ میلی‌متر و پوشش بتنی ۳۰ میلی‌متر می‌باشد. دو لایه بتن مسلح نیز با اتصال‌دهنده‌های برشی خرپایی که از میلگرد به قطر ۶ میلی‌متر تشکیل شده و در فواصل ۲۰۰ میلی‌متر از یکدیگر قرار دارند به یکدیگر متصل شده‌اند. منحنی‌های نیرو- تغییرمکان سه پانل با اتصالات برشی در راستای X و Y و YX برای پانل‌های یک‌طرفه در شکل۱۷ نشان داده شده است[۱۸].



شکل۱۷: مقایسه منحنی‌های نیرو – تغییر مکان در مرکز دال برای تعیین جهت گیری اتصالات برشی در پانل‌های ساندویچی



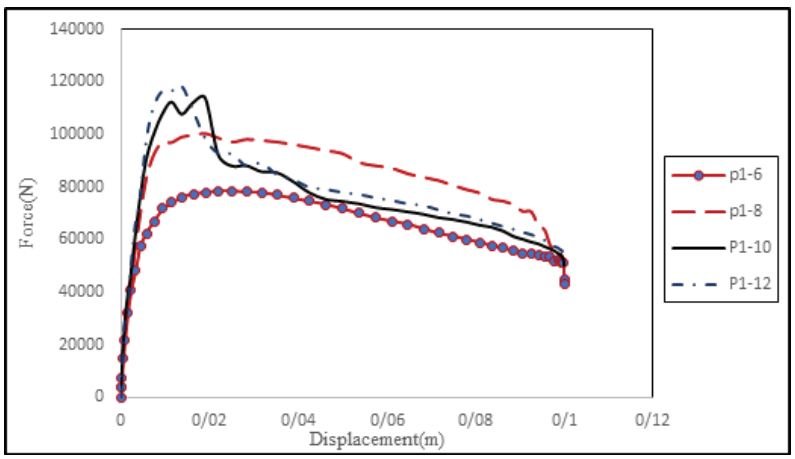
الف) پانل ساندویچی یک‌طرفه با اتصالات برشی خرپایی در جهت(P1-X) x ب) پانل ساندویچی یک‌طرفه با اتصالات برشی خرپایی در جهت y (P1-y)

شکل۱۸: نمای سه بعدی ABAQUS از تغییر شکل (Ut-U۳۳)

با توجه به شکل۱۷ظرفیت بار نهایی به‌دست آمده از آنالیز پانل ساندویچی در حالت استفاده از اتصال برشی در دو جهت x y و در جهتx و جهت y مشاهده می‌شود مقاومت نهایی برای پانل‌های $P_{1\text{-}x}$ و y-P۱ نسبت به $P_{1\text{-}xy}$ به‌ترتیب ۹۲٪ و ۶۵٪ می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد وقتی که پانل ساندویچی پیش‌ساخته به‌عنوان دال یک‌طرفه رفتارمی‌کند قراردادن اتصالات برشی موازی محور X (بعد بزرگتر) برای هم‌بستگی دولایه بتنی به‌منظور عمل کردن آن‌ها به‌عنوان یک واحد کافی است.

۴-۴- تاثیر سختی اتصالات برشی

تاثیر سختی اتصال‌دهنده‌های برشی که به قطر آن‌ها بستگی دارد بر مقاومت نهایی و میزان عملکرد مرکب پانل ساندویچی پیش‌ساخته مطالعه شده است. برای این منظور از پانل یک‌طرفه $(P۱)$به ابعاد۷۰۰×۲۶۰۰ میلی‌متر که به‌صورت سه بعدی در نرم‌افزار ABAQUS مدل گردیده استفاده شده است. چهار مدل با اتصال‌دهنده‌های برشی مختلف ($P۱-۶$ $P۱-۸$ و $P۱-۱۰$ $P۱-۱۲$) به صورت غیرخطی آنالیز شده است. (شاخص اول یک‌طرفه بودن پانل و شاخص دوم نمره میلگرد اتصال برشی را نشان می‌دهد). از آنجا که سختی محوری نسبت مستقیم با سطح مقطع دارد افزایش تعداد ردیف اتصال دهنده‌ها با افزایش سطح مقطع میلگردهای مورد استفاده مدل شده و هر مدل با بارگذاری افزایشی تا مرحله گسیختگی بارگذاری شده است. در شکل۱۹ منحنی بار-تغییر مکان در وسط دهانه برای هر چهار پانل ($P۱-۶$ $P۱-۸$ و $P۱-۱۰$ $P۱-۱۲$) در مراحل مختلف نشان داده شده است.

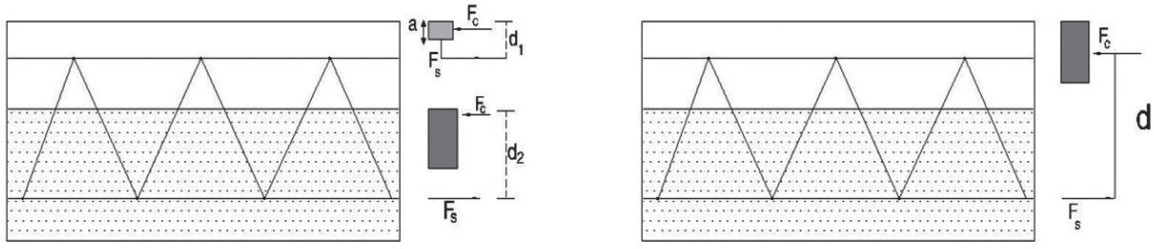


شکل۱۹: منحنی نیرو – تغییر مکان پانل ساندویچی با تغییر قطر اتصال‌دهنده‌های برشی

با توجه به نمودار شکل۱۹ مشاهده می‌شود با افزایش تعداد ردیف‌های اتصال‌دهنده‌های برشی که با توجه به قطر آن‌ها اندازه‌گیری شده است بار نهایی و میزان عملکرد مرکب پانل‌های ساندویچی افزایش می‌یابد و بستگی زیادی به سختی اتصال‌دهنده‌های برشی دارد. همچنین مشاهده می‌شود در مرحله غیرخطی با افزایش سطح مقطع میلگرد ($P۱-۱۰$ $P۱-۱۲$) بیش از محدودیت آیین نامه بتن ترد می‌شود و شکل پذیری کاهش می‌یابد. بنابراین با توجه افزایش مقاومت اولیه بار نهایی کاهش می‌یابد.

۵- میزان عملکرد کامپوزیت پانل در بار نهایی

برای سنجش میزان رفتار مرکب پانل‌های $P۱-۶$ $P۱-۸$ $P۱-۱۰$ $P۱-۱۲$ در بار نهایی مقدار ظرفیت بار نهایی پانل با فرض عملکرد کاملا مرکب و نیز مقدار بار نهایی با فرض عملکرد غیر مرکب دو لایه به صورت تئوری محاسبه شده است. نسبت بار نهایی به‌دست آمده از آنالیز مدل (شکل۱۹) به بار نهایی تئوری با فرض عملکرد کاملا مرکب به‌عنوان معیاری برای تخمین عملکرد مرکب پانل استفاده شده است با توجه به شکل۲۰مقدار بارنهایی در هر حالت محاسبه شده است[۲۰].



ب: عملکرد کاملا مرکب(برای یک متر طول) الف: عملکرد کاملا غیر مرکب (برای یک متر طول)

شکل۲۰: عملکرد غیر مرکب و کاملا مرکب پانل

الف) مقدار بار نهایی با عملکرد غیرکامپوزیت

هنگامی که هیچ‌گونه عملکرد کامپوزیتی درمقاومت نهایی در نظر گرفته نشده است (شکل۲۰- الف) ظرفیت خمشی نهایی پانل به صورت زیر محاسبه خواهد شد.

$$A_s1 = 141.35mm^2 \qquad A_s2 = 392.7mm^2$$

$$\alpha = 0.85 - 0.015F_c \qquad d_1 = 33mm \qquad d_2 = 85mm$$

$$F_c1 = \alpha\varphi_c F_c ba = 9242a \qquad F_s1 = \varphi_s A_s F_y = 36044N$$

$$F_s1 = F_c1 \rightarrow a = 4mm \qquad F_s2 = \varphi_s A_s F_y = 133518N$$

$$F_c2 = \alpha\varphi_c F_c ba = 3799a \qquad F_s2 = F_c2 \rightarrow a = 35mm$$

$$M_{u1} = F_s1\left(d_1 - \frac{a}{2}\right) \rightarrow M_{u1} = 1117N.m \qquad M_{u2} = F_s\left(d_2 - \frac{a}{2}\right) \rightarrow M_{u2} = 9013N.m$$

$$M_u = M_{u1} + M_{u2} \rightarrow M_u = 10130N.m \qquad w = \frac{4M_u}{L^2} = 15585$$

$$P_u = 2w \rightarrow P_u = 2\times 15585 = 31170N$$

ب) مقدار بار نهایی با عملکرد کامپوزیت

هنگامی که پانل به طور کامل کامپوزیت در مقاومت نهایی (شکل ۲۰ - ب) فرض می‌شود ظرفیت خمشی نهایی پانل به شرح زیر محاسبه می‌شود.

$$F_s1 = 36044 \qquad F_s2 = 133518N \qquad F_c1 = 9242a$$

$$a = 10.6mm \qquad d = 150mm$$

$$M_u = F_c1\left(d - \frac{a}{2}\right) + F_s1(d - d_1) \rightarrow \qquad M_u = 18393.m$$

$$M_u = \frac{wL}{4} \rightarrow w = \frac{4M_u}{L} = 28297\frac{N}{m}$$

$$P_u = 28297 \times 2 = 56594N$$

در جدول۷ ظرفیت بارنهایی در دو حالت حدی عملکرد مرکب و ظرفیت بارنهایی به‌دست آمده از آنالیز مدل برای هر چهار پانل آورده شده است. مشاهده می‌شود میزان عملکرد مرکب در بارنهایی برای پانل‌های $P1-6$ $P1-8$ و $P1-10$ $P1-12$ به‌ترتیب ٪۷۵ ٪۸۷ ٪۸۹ ٪۹۳ می‌باشد.

بار نهایی تئوری (KN)		بارنهایی (KN) FEM			
غیر کامپوزیت	کاملاً کامپوزیت	**P۱−۶**	**P۱−۸**	**P۱−۱۰**	**P۱−۱۲**
۳۱	۵۷	۴۳	۵۰	۵۱	۵۳

جدول۷: حداکثر نیروی قابل تحمل در بار نهایی با توجه به عملکرد مرکب پانل ساندویچی

۶- نتیجه گیری

این مقاله نتایج یک بررسی تحلیلی از مجموع ۸ پانل ساندویچی بتنی پیش‌ساخته یک‌طرفه را که به‌عنوان دال یک‌طرفه عمل می‌کنند تحت بار خمشی ارائه می‌کند.

۱. مقاومت نهایی و میزان عملکرد مرکب پانل‌های ساندویچی به سختی و ترتیب قرار گرفتن اتصال‌دهنده‌های برشی بستگی دارد.

۲. مقدار بارنهایی و میزان عملکرد مرکب پانل‌های ساندویچی با افزایش تعداد ردیف‌های اتصال‌دهنده‌های برشی افزایش می‌یابد. اما با افزایش بیش از محدودیت آیین نامه بتن ترد شده و باعث کاهش شکل پذیری و کاهش مقاومت نهایی می‌شود.

۳. پانل‌های ساندویچی با دو لایه بتن نسبت به پانل‌های ساندویچی سه‌لایه‌ای دارای سختی کمتری بخصوص در ناحیه خطی می‌باشند.

۴. وقتی که پانل‌های ساندویچی پیش‌ساخته به‌عنوان دال یک‌طرفه رفتار می‌کنند قراردادن اتصالات برشی موازی محور X (بعد بزرگتر) برای هم‌بستگی دولایه بتنی به‌منظور عمل کردن آن‌ها به‌عنوان یک واحد کافی است.

۵. مقایسه بار نهایی در عملکرد کاملا کامپوزیت به‌دست آمده در محاسبات تئوری و مدل‌های المان محدود پانل‌های ساندویچی مورد مطالعه عملکرد کامپوزیت در پانل‌های ساندویچی مورد مطالعه را نشان دادند.

۶. پانل‌های ساندویچی با سه‌لایه بتن رفتار سازه‌ای بهتر و شکل پذیری بیشتری نسبت به پانل‌های با دو لایه بتن دارند.

۷. پانل‌های با لایه فوقانی ساخته شده از بتن الیافی مقاومت و رفتار نسبی مناسب‌تری نسبت به پانل‌های مشابه با لایه فوقانی دارای بتن مسلح معمولی داشتند بنابراین الیاف فولادی می‌تواند جایگزین مناسب برای میلگرد جهت مسلح کردن بتن باشد.

۸. پانل‌های ساندویچی بدلیل تولید به‌صورت پیش‌ساخته از کنترل کیفیت بهتر و اجرای ساده برخوردار است و کاهش هزینه و امکان تولید انبوه و بالا رفتن سرعت حمل و نقل و سهولت اجرای ساختمان به خصوص در ارتفاع و مناطق صعب العبور می‌شود.

مراجع

[1] Sani Mohammed Bida Farah Nora Aznieta Abdul Aziz Mohd Saleh Jaafar Farzad Hejazi and Nabilah Abu Bakar (2021). Thermal Resistance of Insulated Precast Concrete Sandwich Panels. International Journal of Concrete Structures and Materials.(2021)15:41.

[2] Richard 'Hegarty Aidan Reilly Roger West Oliver Kinnane (2020). Thermal investigation of thin precast concrete sandwich panels. Journal of Building Engineering 27 (2020) 100937.

[3] Wonchang Choi Seok-Joon Jang Hyun-Do Yun (2019). Design properties of insulated precast concrete sandwich panels with composite shear connectors. Journal of Composites Part B 157 (2019) 36–42.

[4] 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

[5] 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.

[6] Thomas G. Norris An Chen. (2016). Development of insulated FRP-confined Precast Concrete Sandwichpanel with side and top confining plates and dry bond. Journal of Composite Structures 152 (2016) 444–454.

[7] Karthik Ram Ramakrishnan and et al (2016). Experimental study of the medium velocity impact response of sandwich panels with different cores. Journal of Materials and Design 99 (2016) 68–82.

[8] 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).

[9] 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 7158–143(2016) .

[10] 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.

[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] Noridah Mohammad. A. I. Khalil A. A. Abdul Samad and W.I. Goh. (2014). Structural behav-

ior 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.

[13] 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.

[14] Ahmad I. Mohamad N. (2011). Structural behavior of precast lightweight concrete sandwich panel under Eccentric Load: An over view. University Tun Hussein Onn Malaysia.

[15] Schumann E. Vallee T. and Keller T. (2008). Direct load transmission in sandwich slabs with lightweight concrete core. Tailor Made Concrete Structures-Walraven & Stoelhorst (eds) 2008 Taylor & Francis Group London lSBN 978-0-415-47535-8.

[16] 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.

[17] Schumann E. (2008). Hybrid FRP-lightweight concrete sandwich system for Engineering structures. Thesis Dipl. Lag. Vniversitat Karlsruhe Allemagne et De Nationalite Allemande.

[18] 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.1March 2007.

[19] 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.

[20] 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

[21] Einea A. Salmon D. Tadros M. and Culp T. (1994). A new structurally and thermally efficient precast sandwich panel system. PCI Journal July-August1994 90-101.

[22] ABAQUS Finite Element Program Theory Manual (version 6. 12. 1). Hibbit Karlssson & Sorenson Inc. USA 1993.

[23] Kent D.C. and park R. (1971). Flexural Members with Confined Concrete Journal of Structural Division Proceedings of the American Society of Civil Engineers Vo l.97 No. ST7 1969-1990.

[24] Park R. and Paulay T. (1975). Reinforced Concrete Structures Johen Wiley and Sons.

[25] Hsuan T-H. Minglin Fu. Jan Y-Y.(2004) Nonlinear finit element analysis of reinforced concrete Beams strengthened by Fiber-reinforced plastics.Department of Civil Engineering National Cheng Kung University Tainan 701 Taiwan.