

تقویت برشی تیرهای بتن آرمه با پانلهای پیش ساخته بتن فوق توانمند الیافی

کیان آغنی

دانشجو دکتری مهندسی عمران - دانشگاه صنعتی سهند تبریز
kian.aghani@gmail.com

حسن افشین

دانشیار دانشکده مهندسی عمران - دانشگاه صنعتی سهند تبریز
hafshin@sut.ac.ir

چکیده

در این پژوهش کاربرد استفاده از پانلهای پیش ساخته بتن فوق توانمند الیافی یا UHPFRC در تقویت برشی تیرهای بتن مسلح به صورت آزمایشگاهی و عددی مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته است. تعداد ۸ نمونه تیر مسلح شده بتن معمولی به ابعاد (۱۰×۲۰×۱۵۰ cm) با دو ظرفیت خمشی مختلف و کمبود ظرفیت برشی ساخته شده‌اند. ۴ عدد از این نمونه‌ها به عنوان نمونه‌های کنترلی و ۴ عدد دیگر به عنوان نمونه‌های تقویت شده با پانلهای پیش ساخته UHPFRC به ابعاد (۳×۱۵×۱۲۶ cm) تحت آزمایش بارگذاری سه نقطه‌ای قرار گرفته‌اند. نتایج بدست آمده از آزمایش نشان می‌دهند که پانلهای پیش ساخته UHPFRC در تقویت برشی تیرهای بتن مسلح دارای عملکرد خوبی می‌باشند. در همین راستا، مدل‌سازی سه بعدی برای بررسی رفتار تیرهای بتن آرمه تقویت شده با پانلهای پیش ساخته UHPFRC توسط نرم‌افزار المان محدود ABAQUS انجام شده است. بدین منظور، مدل عددی برای تعریف رفتار خمشی بتن UHPFRC و اتصال پانلهای UHPFRC به سطح تیرها ارائه شده است. مدل‌سازی عددی نیز نشانگر عملکرد خوب این پانل‌ها در تقویت برشی تیرهای بتن مسلح می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: سازه‌های بتن آرمه، بتن فوق توانمند الیافی، مقاوم سازی، پانلهای پیش ساخته

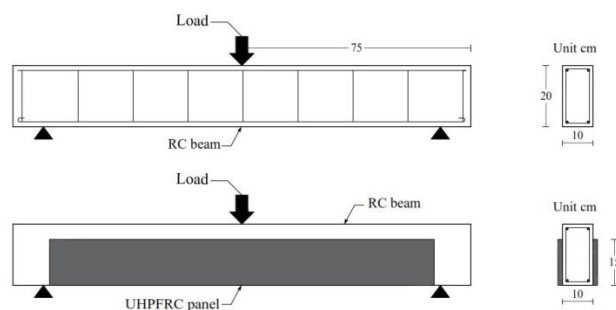
امروزه نیاز به تقویت و مقاومسازی سازه‌ها امری اجتناب ناپذیر است. استفاده از ورق‌های کامپوزیت FRP، ژاکت‌های فولادی و بتنی، بتن‌پاشی (شات کریت) و غیره را می‌توان از متداول‌ترین روش‌های تقویت و تامین تغییر شکل اعضا دانست. هر کدام از روش‌های ذکر شده دارای مزایا و معایبی هستند. کاربرد استفاده از بتن‌های با مقاومت بالا و UHPFRC جهت تقویت و مقاومسازی اعضای بتن‌آرمه، در حال افزایش روز افزون است. بتن UHPFRC نوعی بتن با مقاومت و کارایی بالا می‌باشد که به تازگی توجه مهندسين را جلب کرده است. مقاومت فشاری و خمشی بتن UHPFRC به ترتیب تا ۲۰۰ و ۴۰ مگاپاسکال می‌باشد. از دیگر مزایای این نوع بتن می‌توان به مقاومت سایشی بالا، مقاومت بالا در برابر عوامل محیطی و سیکل‌های ذوب و یخبندان، دوام و شکل پذیری بالا اشاره کرد. میزان درصد الیاف مصرفی در این نوع بتن بین ۱٪ تا ۴٪ حجمی می‌باشد [۱].

تحقیقات نشان داده است که استفاده از بتن‌های الیافی با مقاومت بالا به عنوان لایه تقویتی می‌تواند به خوبی نقاط ضعف نمونه‌ها را بهبود دهد. تایه و همکاران از UHPFRC جهت ترمیم ناحیه خورده شده از عضو بتن مسلح استفاده کردند. نتایج تحقیقات ایشان چسبندگی بالا بین بتن معمولی و UHPFRC را نشان می‌دهد [۲]. ایساکف و همکارانش از HSFRC در ناحیه فشاری عضو خمشی به منظور افزایش ظرفیت باربری استفاده کردند. نتایج آنها افزایش ظرفیت قابل توجه عضو را نشان می‌دهد اما مشکل جداشدگی بتن معمولی و HSFRC، این روش را غیر قابل اطمینان می‌کند [۳]. مارتینولا و همکارانش در نتایج تحقیقات خود بیان کردند که استفاده از ژاکت بتن FRC می‌تواند ظرفیت باربری عضو را افزایش دهد ولی استفاده از ژاکت احتیاج به بتن ریزی نیاز درجا دارد که باعث افزایش هزینه‌ها و زمان می‌شود [۴]. وانگ و همکاران از صفحات پیش ساخته بتن با مقاومت بسیار بالا الیافی (UHSFRC) برای تقویت برشی تیرهای بتن آرمه استفاده کردند. نتایج آنها تاثیر مثبت این صفحات را در تقویت تیرهای بتنی نشان داد اما وجود مشکل جداشدگی صفحات از سطح تیرها، این روش را غیر قابل اطمینان می‌کند [۵].

در این مقاله برای حل مشکل جداشدگی، کاهش هزینه‌ها و همچنین سهولت اجرا، نویسندگان روش نوینی را جهت تقویت تیرهای بتن مسلح ارائه داده‌اند. در این پژوهش از پانل‌های پیش ساخته UHPFRC برای تقویت برشی تیرهای بتن آرمه استفاده شده است.

۲- روش تقویت تیرها

در این تحقیق، از پانل‌های پیش ساخته UHPFRC به عنوان قطعات چسبانده شده به وجوه جانبی تیرهای بتن آرمه جهت تامین مقاومت برشی و خمشی استفاده شده است. تعداد ۸ نمونه تیر مسلح شده بتن معمولی با ابعاد (۱۵۰×۲۰×۱۰ cm) با دو ظرفیت خمشی مختلف و با نقاط ضعف و کمبود ظرفیت برشی ساخته شده‌اند. ۴ عدد از این نمونه‌ها به عنوان نمونه‌های کنترلی و ۴ عدد دیگر به عنوان نمونه‌های تقویت شده با پانل‌های پیش ساخته UHPFRC با ابعاد (۱۲۶×۱۵×۳ cm) می‌باشند. شکل ۱ نحوه تقویت تیرهای بتن آرمه و جدول ۱ جزئیات تیرها را نشان می‌دهد.



شکل ۱ نحوه تقویت تیرهای بتن آرمه

جدول ۱ جزئیات تیرهای بتن آرمه

نمونه	نوع	آرماتور کششی	آرماتور فشاری	آرماتور برشی	تعداد
B	کنترلی	۱۰Φ۲	۶Φ۲	cm۲۰at۶Φ	۲
S	کنترلی	۱۲Φ۲	۶Φ۲	cm۲۰at۶Φ	۲
B-re	تقویت شده	۱۰Φ۲	۶Φ۲	cm۲۰at۶Φ	۲
S-re	تقویت شده	۱۲Φ۲	۶Φ۲	cm۲۰at۶Φ	۲

برای یافتن ظرفیت باربری نمونه‌ها، از آزمایش بارگذاری سه نقطه‌ای با دهانه خالص ۱۳۰ سانتیمتر استفاده شده است. همچنین آزمایش تعیین مقاومت فشاری بر روی نمونه‌های تمامی بتن‌های ساخته شده انجام شده است.

۳- مصالح

برای ساخت بتن معمولی و UHPFRC از طرح اختلاط ارائه شده در جدول ۲ استفاده شده است. مقاومت فشاری استاندارد ۲۸ روزه بتن معمولی و UHPFRC به ترتیب ۳۴ و ۱۴۰ مگاپاسکال می‌باشد. شکل ۲ نمونه‌ای از پانل‌های پیش ساخته UHPFRC را نشان می‌دهد.

جدول ۲ طرح اختلاط بتن UHPFRC و بتن معمولی

ماده	بتن معمولی (kg/m ³)	UHPFRC (kg/m ³)
سیمان	۳۷۲	۹۲۰
آب	۲۱۱	۲۱۰
ماسه	۹۶۵	-
نخودی	۸۵۵	-
ماسه سیلیسی	-	۸۶۰
فوق روان کننده	-	۳۱
میکروسیلیس	-	۲۱۹
پودر سیلیس	-	۷۵
الیاف فولادی	-	۱۵۷



شکل ۲ پانل‌های پیش ساخته UHPFRC

۴- الحاق پانل‌های پیش ساخته

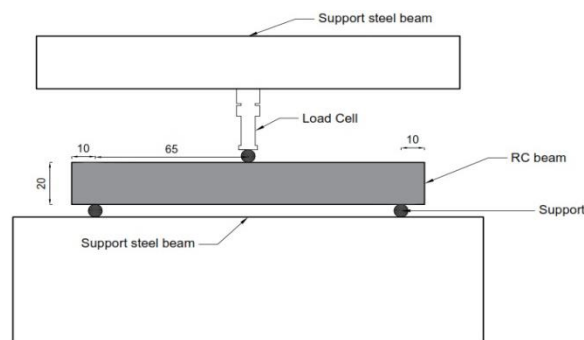
ابتدا سطوح تیرهای بتن معمولی با عمق کم تراشیده است. پس از تمیز کردن سطوح تیرها، چسب رزین اپوکسی با نام صنعتی Sikadur 330 که مشخصات مکانیکی آن مطابق جدول ۳ می‌باشد، به سطوح جانبی تیر و سطح ناصاف پانل‌های پیش ساخته UHPFRC مالیده شده است. پس از تثبیت و قرارگیری مناسب پانل‌های پیش ساخته UHPFRC بر روی سطوح تیرهای بتن مسلح، به نمونه‌ها مدت ۷ روز مهلت گیرش (بر اساس توصیه شرکت سازنده چسب [۶]) داده شده است. از هیچ گونه پیچ یا پرچ برای الحاق پانل‌های پیش ساخته به سطوح تیر استفاده نشده است.

جدول ۳ مشخصات مکانیکی چسب رزین اپوکسی [۶]

مقاومت کششی	مدول خمشی	مدول کششی
MPa	GPa	GPa
۳۰	۳/۸	۴/۵

۵- روش آزمایش

در این پژوهش برای یافتن ظرفیت باربری تیرهای کنترلی و تقویت شده، از آزمایش بار سه نقطه‌ای فزاینده با دهانه خالص ۱۳۰ سانتیمتر استفاده شده است. شکل شماتیک نحوه آزمایش مطابق شکل ۳ و نمونه‌ای از آزمایش مطابق شکل ۴ می‌باشد.



شکل ۳ نحوه آزمایش بار سه نقطه‌ای فزاینده به صورت شماتیک



شکل ۴ نحوه آزمایش بار سه نقطه‌ای فزاینده

در این آزمایش از جک هیدرولیکی با ظرفیت ۲۰ تن با بازشدگی ۵ سانتیمتر و LVDT با ظرفیت بازشدگی ۲۵ میلیمتر و حساسیت ۰/۰۱ میلیمتر برای اندازه‌گیری تغییر مکان میانه دهانه استفاده شده است. تمامی آزمایشات در محل آزمایشگاه سازه دانشگاه صنعتی سهند انجام شده است

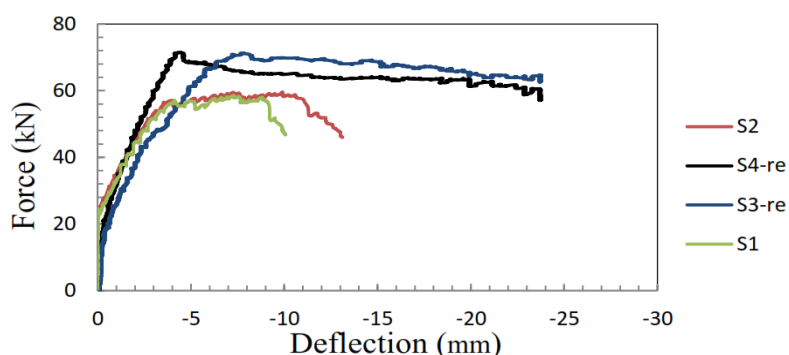
۶- نتایج آزمایش بر روی سری S و S-re

نتایج حاصل از آزمایش بر روی سری S و S-re، افزایش قابل توجه ظرفیت باربری، سفتی و ظرفیت جذب انرژی را نشان می‌دهد. جزئیات بدست آمده از آزمایش مطابق جدول ۴ و همینطور نمودار منحنی‌های بار-تغییر

مکان میانه دهانه مطابق شکل ۵ می‌باشد. با توجه به نتایج آزمایشات، تمامی خرابی‌ها به صورت شکست خمشی در پانل‌های چسبانده شده و تیر اصلی می‌باشد و حداکثر اندازه ترک به صورت تقریبی ۲ سانتی متر بوده است شکل ۶. لازم بذکر است که هیچگونه جداشدگی مابین پانل‌های چسبانده شده و تیر اصلی تحت بارگذاری رخ نداده است. الگوی ترک خوردگی تیرهای سری S و S-re مطابق شکل ۷ می‌باشد.

جدول ۴ نتایج آزمایش بر روی تیر نوع S و S-re

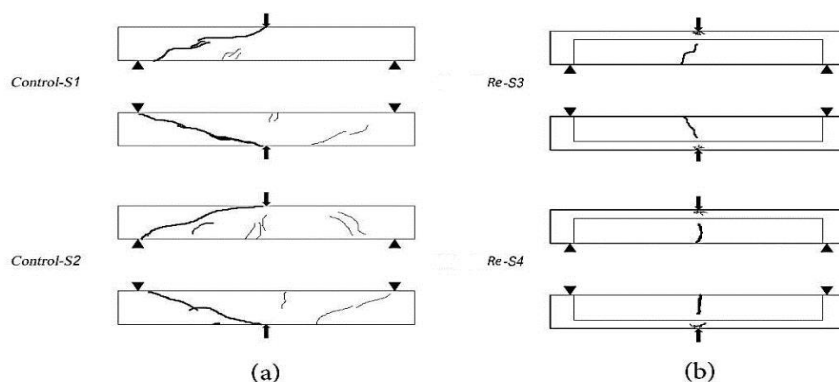
نمونه	بار حداکثر kN	نوع خرابی
S1	۵۸/۱	شکست برشی
S2	۵۹/۷	شکست برشی
S3-re	۷۳/۰	شکست خمشی
S4-re	۷۲/۳	شکست خمشی



شکل ۵ نمودار مقایسه منحنی‌های بار- تغییر مکان میان دهانه تیرهای S و S-re



شکل ۶ نحوه ترک خوردگی تیر تقویت شده از نوع S-re



شکل ۷ الگوی ترک خوردگی سری (a) کنترلی S و (b) تقویت شده S-re

۷- نتایج آزمایش بر روی سری B و B-re

نتایج حاصل از آزمایش بر روی سری B و B-re، افزایش قابل توجه ظرفیت باربری، سفتی و ظرفیت جذب انرژی را نشان می‌دهد. جزئیات بدست آمده از آزمایش مطابق جدول ۵ نمودار و همینطور منحنی‌های بار- تغییر مکان میانه دهانه مطابق شکل ۸ می‌باشد. با توجه به نتایج آزمایشات، تمامی خرابی‌ها به صورت شکست خمشی در پانل‌های چسبانده شده و تیر اصلی می‌باشد و حداکثر اندازه ترک به صورت تقریبی ۳ سانتی متر بوده است شکل ۹. لازم بذکر است که هیچگونه جداشدگی مابین پانل‌های چسبانده شده و تیر اصلی تحت بارگذاری رخ نداده است. الگوی ترک خوردگی تیرهای سری B و B-re مطابق شکل ۱۰ می‌باشد.

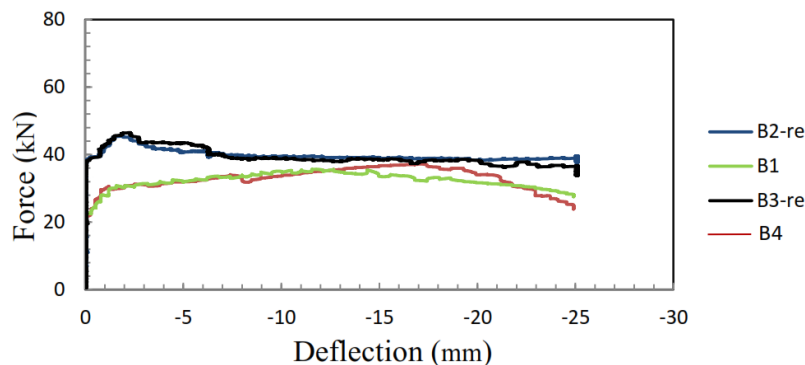
جدول ۵ نتایج آزمایش بر روی تیر نوع B و B-re

نمونه	بار حداکثر kN	نوع خرابی
B1	۳۶/۰	شکست خمشی - برشی
B4	۳۸/۲	شکست خمشی - برشی
B2-re	۴۶/۸	شکست خمشی
B4-re	۴۷/۵	شکست خمشی

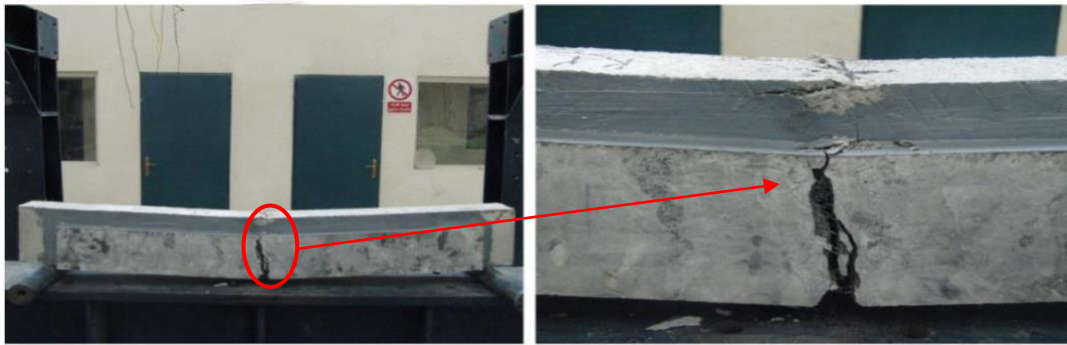
همانطور که نتایج آزمایش نشان می‌دهد پانل‌های پیش ساخته UHPFRC باعث افزایش ظرفیت باربری تیرهای مسلح بتن معمولی شده است. همچنین علاوه بر افزایش ظرفیت باربری، نحوه خرابی تیرهای تقویت شده را از حالت شکست ناگهانی به حالت پیش هشدار دهنده بهبود داده است که این امر جزو مزیت‌های مهم یک روش مقاوم‌سازی به حساب می‌آید. از دیگر نتایج مهم آزمایش، افزایش ظرفیت جذب انرژی در تیرهای تقویت شده می‌باشد که این میزان افزایش برای تیرهای تقویت شده نوع S-re و B-re به صورت میانگین تقریباً برابر ۲۷۸٪ و ۱۵۹٪ می‌باشد. همچنین هیچگونه جداشدگی مابین پانل‌های چسبانده شده و تیر اصلی تحت بارگذاری وجود نداشته است. جمع بندی نتایج حاصل از آزمایش به قرار جدول ۶ می‌باشد.

جدول ۶ جمع بندی نتایج حاصل از آزمایش

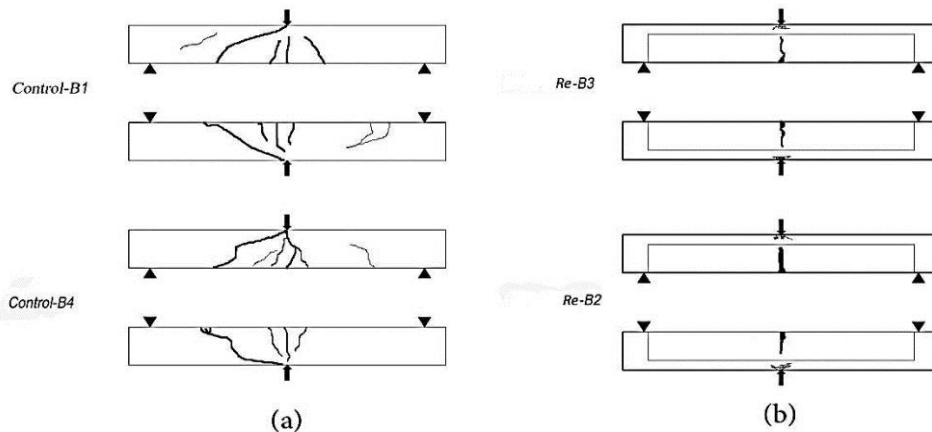
نمونه	نوع	میانگین میزان افزایش ظرفیت باربری (kN)	میزان افزایش ظرفیت باربری (%)	میزان افزایش ظرفیت جذب انرژی (%)	نحوه خرابی
B	کنترلی	—	—	—	شکست خمشی - برشی
B-re	تقویت شده	۱۰/۰۵	۲۷/۰	۱۵۹	شکست خمشی
S	کنترلی	—	—	—	شکست برشی
S-re	تقویت شده	۱۳/۷۵	۲۳/۲	۲۷۸	شکست خمشی



شکل ۸ نمودار مقایسه منحنی‌های بار- تغییر مکان میانه دهانه تیرهای B و B-re



شکل ۹ نحوه ترک خوردگی تیر تقویت شده از نوع B-re



شکل ۱۰ الگوی ترک خوردگی سری (a) کنترلی (b و B) تقویت شده B-re

۸- مدل سازی عددی

برای مدل سازی، از نرم افزار المان محدود ABAQUS/CAE 6.12 استفاده شده است. به دلیل رفتار غیر خطی شدید موجود در مصالح، نوع تحلیل در نظر گرفته شده به صورت Dynamic - Explicit می باشد و نیز از روش کنترل تغییر مکان برای یافتن ظرفیت باربری تیرهای کنترلی و تقویت شده و نیز رفتار پس از ایجاد ترک های پلاستیک استفاده شده است.

۹- مدل سازی بتن

برای مدل سازی بتن از المان SOLID C3D8R و نوع ایزوتروپیک که قابلیت تعریف خصوصیات برای تحلیل های خطی و غیر خطی را دارد، استفاده شده است. برای تعریف خصوصیات رفتار غیر خطی بتن از مدل خسارت پلاستیک بتن استفاده شده است.

خصوصیات رفتار خسارت پلاستیک بتن به شرح ذیل در نظر گرفته شده می باشد:

زاویه اتساع برابر ۳۲ درجه برای بتن معمولی و ۳۹ درجه برای بتن UHPFRC

پتانسیل خروج از مرکز برابر پیش فرض نرم افزار ۰/۱ [۷]

ویسکوزیته برابر پیش فرض نرم افزار صفر [۷]

نسبت مقاومت در تنش دومی محوری به تک محوره برابر پیش فرض نرم افزار ۱/۱۶ [۷]

برای تعریف رابطه تنش- کرنش فشاری بتن باید اطلاعات مربوط به مقاومت فشاری، کرنش غیر خطی را در دست داشت. نرم افزار ABAQUS از رابطه ۱ مقادیر کرنش واقعی را به کرنش غیر خطی تبدیل می کند. [۷]

$$\tilde{\varepsilon}_c^{in} = \varepsilon_c - \varepsilon_0^{cl} \quad (1)$$

همینطور نرم افزار ABAQUS از رابطه ۲ مقادیر کرنش پلاستیک متناظر با مقاومت فشاری لحظه‌ای بتن را محاسبه می‌کند [۷].

$$\tilde{\varepsilon}_c^{pl} = \tilde{\varepsilon}_c^{in} - \frac{d_c}{1-d_c} \frac{\sigma_c}{E_c} \quad (2)$$

به منظور تعریف رفتار فشاری بتن معمولی از رابطه تنش-کرنش ارائه شده توسط Hsu استفاده شده است [۸]. رابطه ۳ متغیرهای محاسباتی جهت تعیین رفتار فشاری بتن معمولی را ارائه می‌دهند.

$$\sigma_c = \left(\frac{\beta(\varepsilon_c/\varepsilon_0)}{\beta - 1 + (\varepsilon_c - \varepsilon_0)^\beta} \right) \sigma_{cu} \quad (3)$$

که در رابطه بالا σ_{cu} و ε_0 به ترتیب مقاومت فشاری حداکثر بتن و کرنش متناظر با آن است. پارامتر β بر اساس دیاگرام تنش-کرنش فشاری بتن تعیین می‌شود.

برای تعریف رفتار فشاری بتن UHPFRC مانند قسمت قبل به پارامترهای مقاومت فشاری لحظه‌ای، کرنش غیر-خطی و پارامتر آسیب نیاز داریم. برای این منظور، از روابط ارائه شده توسط Graybeal استفاده می‌کنیم [۹]. از روابط ۴ تا ۶ برای محاسبه تنش لحظه‌ای بتن UHPFRC استفاده شده است.

$$f_c = \varepsilon_c E (1 - \alpha) \quad (4)$$

$$E = 3840 \sqrt{f'_c} \quad MPa \quad (5)$$

$$\alpha = a e^{\frac{\varepsilon_c E}{b f'_c}} - a \quad (6)$$

که در رابطه بالا a و b به ترتیب ۰/۱۱ و ۰/۲۴ محاسبه می‌شوند. مشخصات مکانیکی در نظر گرفته شده برای بتن معمولی و UHPFRC به قرار جدول ۷ می‌باشد.

برای تعریف رابطه تنش-کرنش کششی بتن باید اطلاعات مربوط به مقاومت کششی، کرنش غیر خطی را در دست داشت. نرم افزار ABAQUS از رابطه ۱ مقادیر کرنش واقعی را به کرنش غیر خطی تبدیل می‌کند. [۷]
همینطور نرم افزار ABAQUS از رابطه ۷ مقادیر کرنش پلاستیک متناظر با مقاومت کششی لحظه‌ای بتن را محاسبه می‌کند [۷].

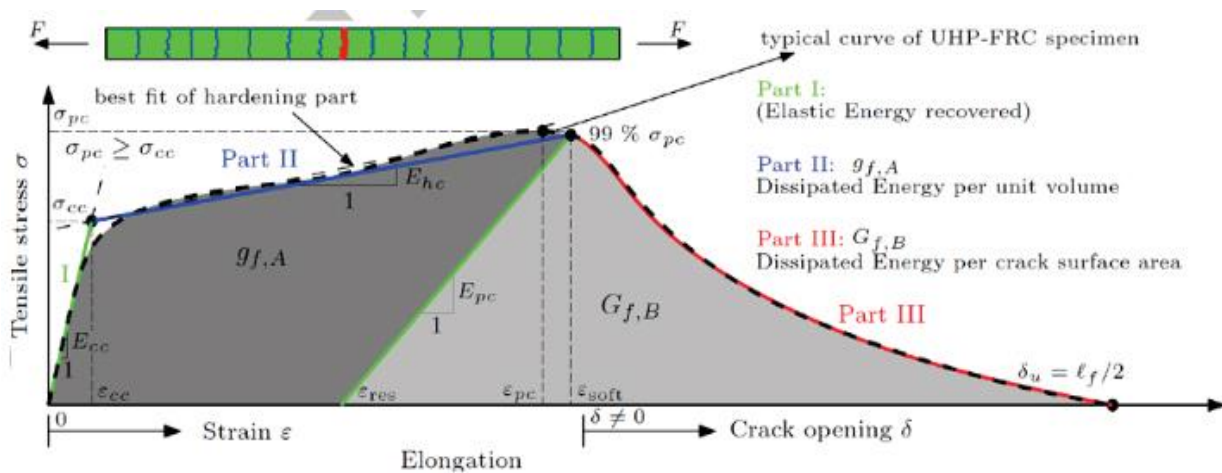
جدول ۷ مشخصات مکانیکی در نظر گرفته شده برای بتن معمولی و UHPFRC در نرم افزار

Density (kg/m ³)	f _c (MPa)	ν	E (MPa)	
۲۵۰۰	۱۴۰	۰/۲۱	۴۵۴۳۵	UHPFRC
۲۴۰۵	۳۴	۰/۲۰	۲۶۸۷۰	NC

$$\tilde{\varepsilon}_c^{pl} = \tilde{\varepsilon}_c^{in} - \frac{d_t}{1-d_t} \frac{\sigma_t}{E_c} \quad (7)$$

برای تعیین رفتار کششی بتن پس از ترک خوردگی از مدل پیش فرض نرم افزار ABAQUS استفاده شده است. مقاومت کششی بتن معمولی برابر ۳/۴ مگاپاسکال و حداکثر کرنش غیر خطی برابر ۰/۰۱۲۶ در نظر گرفته شده است.

برای تعریف رفتار کششی بتن UHPFRC از رفتار ارائه شده توسط Wille استفاده شده است [۱۰]. شکل ۱۴ رفتار این نوع بتن را در فاز کششی نشان می‌دهد. از آنجایی نرم افزار ABAQUS تنها رابطه تنش- کرنش کششی را برای حالت پس از ترک خوردگی در نظر می‌گیرد، پس با توجه به توصیه JSCE، فقط از فاز نرم شوندگی برای مدل سازی استفاده شده است [۱۱]. مقاومت کششی بتن UHPFRC برابر ۹/۵ مگاپاسکال و حداکثر جا به جایی برابر ۱ سانتی متر در نظر گرفته شده است.



شکل ۱۴ رفتار کششی بتن UHPFRC [۱۰]

۱۰- مدل سازی فولاد

برای مدل سازی آرماتورهای کششی، فشاری و برشی از المان خربایی سه بعدی T3D2 استفاده شده است. رفتار فولاد به صورت الاستیک- کاملاً پلاستیک و تنش جاری شدن آن برابر ۴۰۰ مگاپاسکال در نظر گرفته شده است.

۱۱- اندرکنش فولاد و بتن

برای تعریف اندرکنش بین بتن معمولی و فولاد از دستور Embed استفاده شده است. این دستور از هرگونه حرکت آرماتور در داخل بتن جلوگیری می‌کند. در واقع آرماتورها در بتن به صورت بدون لغزش مدفون شده‌اند.

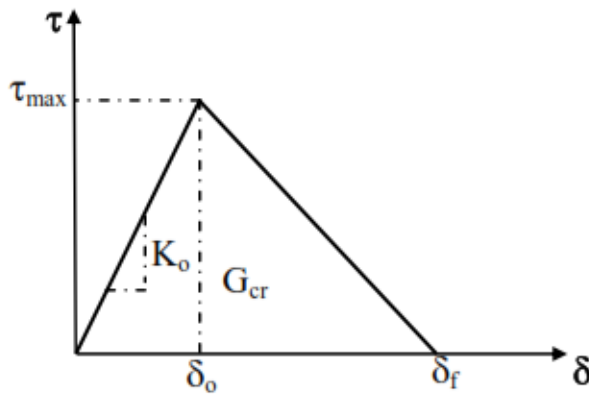
۱۲- اندرکنش صفحات و بتن

به طور کلی مودهای خرابی در تیرهای بتن آرمه تقویت شده با هرگونه صفحه اعم از بتنی یا فولادی یا پلیمری به دو صورت است:

- ایجاد پارگی یا خرابی در صفحه تقویتی

- جداسازی بتن و صفحه تقویتی

با توجه به اینکه در پروژه انجام شده از چسب اپوکسی برای الحاق پانل‌های پیش ساخته به سطح تیر بتن آرمه استفاده شده است، مدل سازی عددی برای بررسی نحوه اندرکنش بتن و چسب لازم است. بدین منظور از المان چسبنده (Cohesive) و برای تعریف رفتار المان مذکور، از مدل تنش-پارگی استفاده شده است. در این رفتار، مواد دارای رفتار الاستیک اولیه تا لحظه پارگی می‌باشند شکل ۱۵. مولفه‌های بردار تنش اسمی شامل σ_n ، τ_1 و τ_2 می‌باشد که به ترتیب تنش‌های نرمال و برشی را نشان می‌دهند. ماتریس سختی اولیه لایه چسبی مستقیماً به ضخامت لایه و سختی ماده بستگی دارد که به طور کلی از رابطه ۸ استخراج می‌شود [۱۲]:



شکل ۱۵ رفتار تعریف شده در مدل تنش-پارگی [۱۲]

$$k_0 = \frac{1}{\frac{t_i}{G_i} + \frac{t_j}{G_j}} \quad (۸)$$

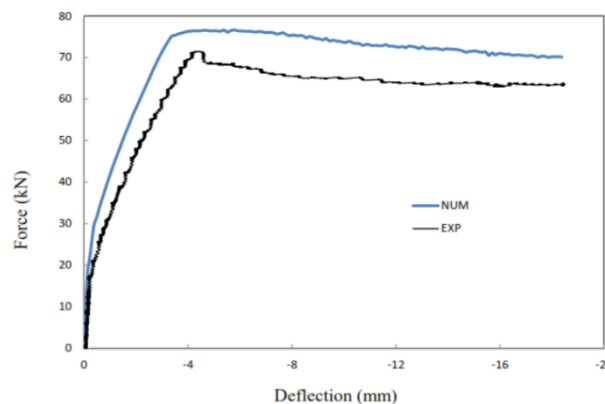
در رابطه ۸، t و G به ترتیب ضخامت و سختی برشی لایه در راستاهای i و j می‌باشد. در هنگام جداشدگی لایه چسبی، ضخامت افزایش و سختی کاهش می‌یابد. به منظور تعیین خسارت ایجاد شده در لایه چسبی از معیار تنش درجه دوم، رابطه ۹، استفاده شده است [۱۲]:

$$\left\{ \frac{\sigma_n}{\sigma_n} \right\}^2 + \left\{ \frac{t_s}{t_s} \right\}^2 + \left\{ \frac{t_t}{t_t} \right\}^2 = 1 \quad (۹)$$

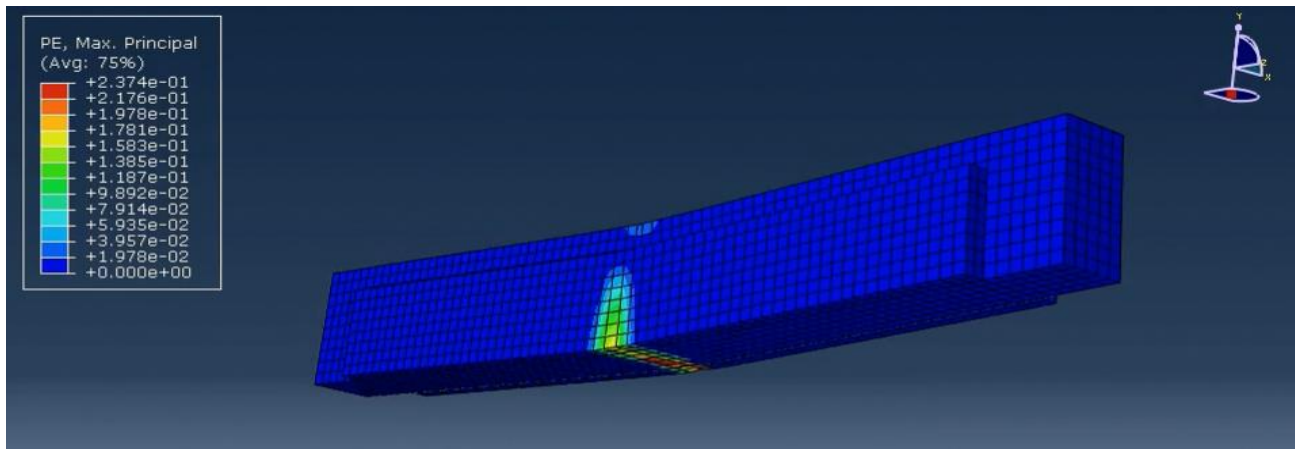
جهت تعیین پارامترهای ذکر شده در رابطه ۹ در نرم‌افزار، از مشخصات مکانیکی اسمی چسب استفاده شده است.

۱۳- نتایج نرم‌افزاری برای S-re

نتایج بدست آمده از آزمایشگاه شامل نمودار بار-تغییر مکان میانه دهانه و نحوه شکست نمونه‌ها با نتایج بدست آمده از تحلیل نرم‌افزاری مقایسه شده است. شرح نتایج در ادامه آمده است. نمودار مقایسه‌ای منحنی‌های بار-تغییر مکان میانه دهانه حاصل از آزمایش و تحلیل نرم‌افزاری بر روی سری S-re، مطابق شکل ۱۶ می‌باشد. با توجه به شکل ارائه شده، اختلاف بین دو نمودار بسیار اندک و در حدود ۶٪ می‌باشد. شکل ۱۷ نحوه خرابی تیر تقویت شده بدست آمده از تحلیل نرم‌افزاری را نشان می‌دهد. همانند نتایج آزمایشگاهی، تحلیل نرم‌افزاری مکانیسم خرابی تیر را به صورت خمشی نشان می‌دهد. همچنین هیچگونه جدا شدگی بین پانل‌های UHPFRC و تیر اصلی وجود نداشته است.



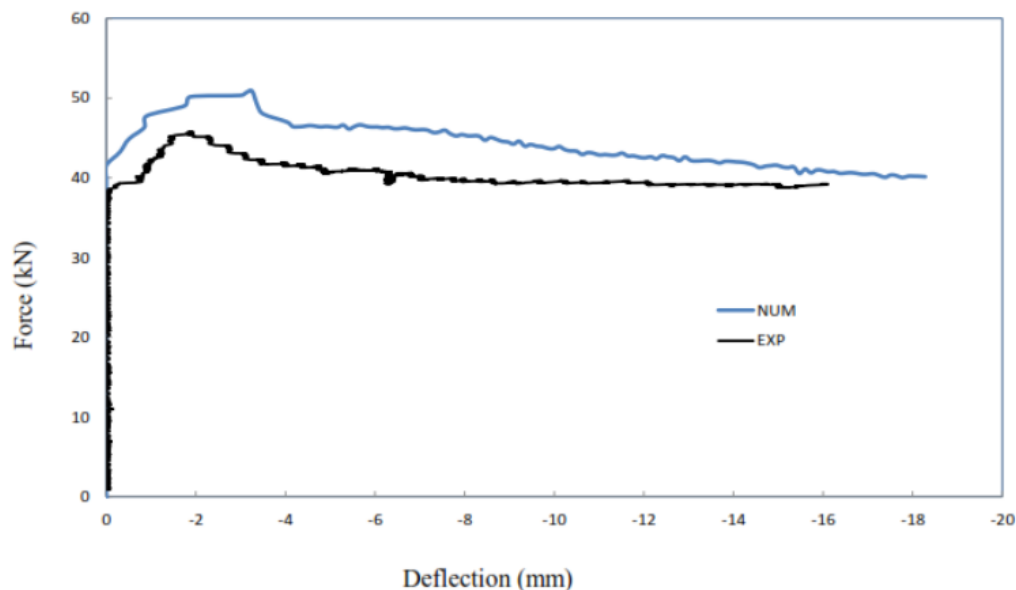
شکل ۱۶ نمودار مقایسه‌ای منحنی‌های بار-تغییر مکان میانه دهانه تیر مقاوم سازی شده از نوع S-re بدست آمده از تحلیل نرم‌افزاری و آزمایش



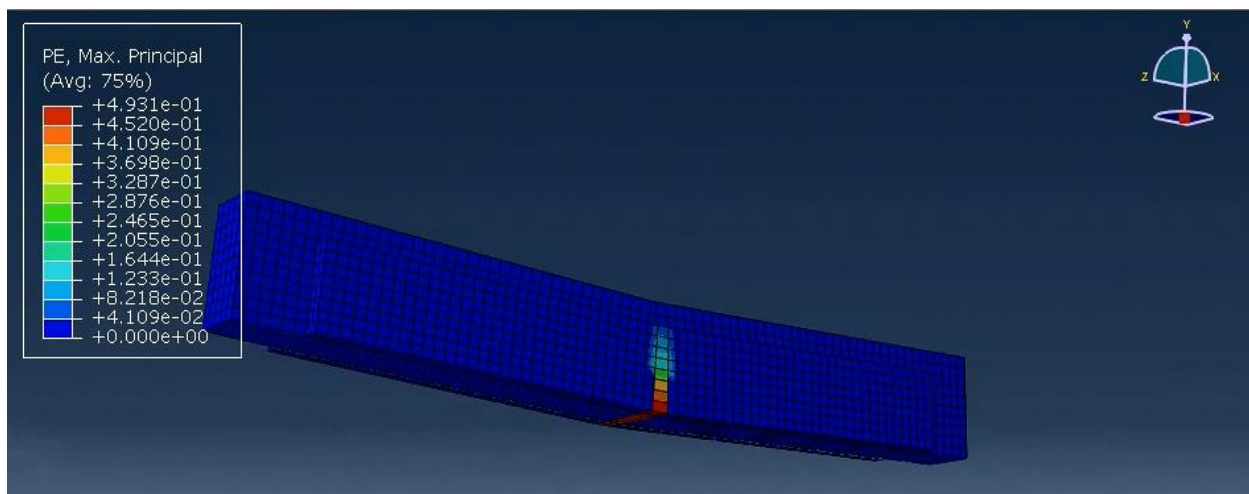
شکل ۱۷ نحوه خرابی تیر مقاوم سازی شده از نوع S-re بدست آمده از تحلیل نرم افزاری

۱۴- نتایج نرم افزاری برای S-re

نتایج بدست آمده از آزمایشگاه شامل نمودار بار-تغییر مکان میانه دهانه و نحوه شکست نمونه‌ها با نتایج بدست آمده از تحلیل نرم افزاری مقایسه شده است. شرح نتایج به صورت ذیل می‌باشد. نمودار مقایسه‌ای منحنی‌های بار-تغییر مکان میانه دهانه حاصل از آزمایش و تحلیل نرم افزاری بر روی سری S-re، مطابق شکل ۱۸ می‌باشد. با توجه به شکل ارائه شده، اختلاف بین دو نمودار بسیار اندک و در حدود ۵٪ می‌باشد. شکل ۱۹ نحوه خرابی تیر تقویت شده بدست آمده از تحلیل نرم افزاری را نشان می‌دهد. همانند نتایج آزمایشگاهی، تحلیل نرم افزاری مکانیسم خرابی تیر را به صورت خمشی نشان می‌دهد. همچنین هیچگونه جدا شدگی بین پانل‌های UHPFRC و تیر اصلی وجود نداشته است.



شکل ۱۸ نمودار مقایسه‌ای منحنی‌های بار-تغییر مکان میانه دهانه تیر مقاوم سازی شده از نوع B-re بدست آمده از تحلیل نرم افزاری و آزمایش



شکل ۱۹ نحوه خرابی تیر مقاوم سازی شده از نوع *B-re* بدست آمده از تحلیل نرم افزار

۱۵- نتیجه گیری

در این پژوهش، به بررسی آزمایشگاهی و عددی رفتار تیرهای بتن آرمه تقویت شده به صورت برشی با پانل‌های پیش ساخته *UHPFRC* پرداخته‌ایم و همچنین میزان افزایش ظرفیت باربری و تاثیر قطعات چسبانده شده بر رفتار عضو در نتایج آزمایشگاهی نشان داده شده و از نتایج تحلیل عددی توسط نرم افزار آباکوس جهت صحت سنجی نتایج استفاده شده است. نتایج کلی این پژوهش به شرح ذیل می‌باشد:

-پانل‌های پیش ساخته *UHPFRC* باعث افزایش ظرفیت باربری تیرهای مسلح بتن معمولی شده است. همچنین علاوه بر افزایش ظرفیت باربری، نحوه خرابی تیرهای تقویت شده را از حالت شکست ناگهانی به حالت پیش هشدار دهنده تغییر داده است که این امر جزو مزیت‌های مهم یک روش مقاوم‌سازی به حساب می‌آید. میزان افزایش مقاومت به صورت میانگین برای تیرهای مقاوم‌سازی شده نوع *B-re*، $27/0\%$ و برای تیرهای مقاوم‌سازی شده نوع *S-re*، $23/2\%$ می‌باشد.

-استفاده از پانل‌های پیش ساخته *UHPFRC* باعث افزایش قابل توجه سفتی نمونه شده است. با توجه به نتایج ارائه شده، الیاف فولادی موجود در این نوع بتن به خوبی توانسته‌اند میزان انرژی جذب شده را افزایش دهند و حتی ظرفیت شکل پذیری نمونه‌ها را تا 278% بهبود بخشند.

از مزیت‌های دیگر تقویت تیرها با پانل‌های پیش ساخته *UHPFRC* می‌توان به حمایت از تیر اصلی در برابر آتش‌سوزی و یخبندان، سهولت روش اجرا، هزینه پائین و دوام بالا اشاره کرد.

-در این پژوهش از چسب رزین اپوکسی برای الحاق پانل‌های پیش ساخته *UHPFRC* به سطوح جانبی تیر بتن مسلح استفاده شده است. با توجه به نتایج بدست آمده و همچنین عدم وجود جداسدگی مابین صفحات بتنی و چسب پس از بارگذاری، استفاده از چسب رزین اپوکسی به عنوان روش الحاقی به منظور اطمینان از عدم جداسدگی پانل‌های پیش ساخته از سطح تیر بتن مسلح تحت بارگذاری و کاهش هزینه‌ها بسیار مناسب می‌باشد.

۱۶- تقدیر

بدینوسیله از مسئولین آزمایشگاه بتن و سازه دانشگاه صنعتی سهند تبریز آقایان ملائی، کرباسی و محمدزاده که ما را در انجام این پژوهش یاری کردند، کمال تشکر و قدردانی را داریم.

۱۷- مراجع

- ۱- آغنی، کیان، "بررسی آزمایشگاهی و عددی مقاوم سازی برشی تیرهای بتن مسلح با صفحات پیش ساخته RPC"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی سهند، دی ماه ۱۳۹۴
2. Tayeh B, Abu Bakar B, Megat Johari M and Voo Y, "Mechanical and permeability properties of the interface between normal concrete substrate and ultra-high performance fiber concrete overlay." *Journal of Construction and Building Materials*, 2012, 36: 538-548.
3. Iskhakov I, Ribakov Y, Holschemacher K and Mueller T, "High performance repairing of reinforced concrete structures." *Journal of Materials and Design*, 2013, 44: 216-222.
4. Martinola G, Meda A, Plizzari GA, Rinaldi Z, "Strengthening and Repair of RC beams with Fiber Reinforced Concrete", *Cement and Concrete Composites*, 2010
5. Jian Wang, Hidenori Morikawa, Tetsuo Kawaguchi, "Shear strengthening of RC beams using Ultra-High-Strength-Fiber-Reinforced Concrete", *Magazine of Concrete Research*, ICE publishing, 2015
6. Sikadur 330® , " Construction Manual – Sikadur 330 2-part Epoxy Impregnation Resin", Sika Gulf B.S.C ©
7. SIMULIA ABAQUS, "ABAQUS Analysis 6.12 User's Manual", ABAQUS Inc.
8. Hsu, L.S., & Hsu, "Complete stress-strain behavior of high-strength concrete under compression." *Magazine of Concrete Research*, 1994, 46(169), 301-312.
9. Graybeal B, "Compressive behavior of Ultra-High-Performance-Fiber-Reinforced Concrete", *ACI Materials Journal*, Technical paper, April 2007, Title no. 107-M17
10. K. Wille, S.EL-Tawil, A.E. Naaman, "Properties of Strain Hardening Ultra High Performance Fiber reinforced Concrete under Direct Tensile Loading", *Journal of Cement & Concrete Composite*, 2014, 68, 53-66
11. JSCE, " Recommendation for Design and Construction of High Performance Fiber Reinforced Cement Composites with multiple fine cracks", *Concrete Engineering Series 82*, March 2008
12. Yasmeeen taleb O, Susanne H, Ola D, "The effect of CFRP and CFRP/concrete interface models when modelling retrofitted RC beams with FEM." *Journal of Composite structures*, 2010, 92, 1391-1398

Shear Strengthening of RC Beams by Prefabricated UHPFRC Panels

Kian Aghani¹, Hassan Afshin²

1- PhD student of Civil Engineering, Sahand University of technology
kian.aghani@gmail.com

2- Associate Professor, Civil Engineering Department, Sahand University of technology
hafshin@sut.ac.ir

Abstract

In this study, applicability of ultra-high performance fiber-reinforced concrete panels in shear strengthening of RC beams was investigated experimentally and numerically. In total, eight RC beams (dimensions 10×20×150 cm) with two different bending capacity and lack of shear strength were produced. Specimens, Four were control beams and four were strengthened with prefabricated UHPFRC panels (dimensions 3×15×126 cm) and were tested in 3-points bending. The results show that this method can be well used for strengthening of RC beams. In this regard, a 3D model using ABAQUS FEM software was used to investigate the strengthening method. For this purpose, numerical models were developed to define flexural behavior of UHPFRC and coupling between NC and UHPFRC. FEM analysis approved the efficiency of the method also.

Keywords: Reinforced concrete structures, UHPFRC, strengthening, prefabricated panel