

بررسی رفتار سازه‌های بتنی بزرگ مقیاس اوریگامی با الگوی میورا تحت بار خمشی

علی محمد صالحی *

دکتری عمران، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان.

داود مستوفی نژاد

استاد، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان.

چکیده

مهندسان اغلب علاقه مند به ایجاد سازه‌هایی با معماری منحصر به فرد و نوآورانه هستند. یکی از چالش‌های موجود در ساخت این سازه‌ها استفاده از مصالح خاص و رسیدن به شکل مطلوب است. در این تحقیق سازه‌هایی در مقیاس بزرگ با استفاده از الگوی اوریگامی میورا، بتن کرباسی با عملکرد بالا و فوق العاده بالا و بتن الیافی با عملکرد فوق العاده بالا برای حل این چالش‌ها ساخته شد. عملکرد سازه‌ها تحت بار خمشی مورد ارزیابی قرار گرفت. سه سازه غیر ساندویچی و یک سازه ساندویچی ساخته شد. سازه‌های غیر ساندویچی با استفاده از بتن کرباسی با عملکرد بالا، بتن الیافی با عملکرد فوق العاده بالا (UHPRFC) و بتن کرباسی با عملکرد فوق العاده بالا ساخته شدند. استفاده از الگوی میورا (Miura) در این نمونه‌ها ظرفیت باربری سازه‌ها را در شرایط مشابه ۲/۵ تا ۴/۳ برابر افزایش داد. همچنین رفتار سازه‌ی ساندویچی با هسته‌ی اوریگامی ساخته شده از بتن کرباسی با عملکرد بالا و صفحات بالا و پایین ساخته شده از UHPRFC بررسی شد که افزایش ۴ و ۸/۹ برابری میزان باربری نسبت به سازه‌های غیر ساندویچی نشان داد.

واژه‌های کلیدی: بتن الیافی با عملکرد فوق العاده بالا، بتن کرباسی با عملکرد فوق العاده بالا، بتن کرباسی با عملکرد بالا، الگوهای میورا، سازه‌های اوریگامی، سازه ساندویچی.

* نویسنده مسئول: a.mohammadsalehi@cv.iut.ac.ir

۱- مقدمه

الگوی میورا یکی از الگوهای اساسی اورینگامی است که در مهندسی محبوبیت پیدا کرده است [۱،۲]. سازه‌های اورینگامی کاربردهای عملی مهندسی در دستگاه‌های زیست پزشکی، زیردریایی‌ها، خودروها، ابزارهای خود تاشو و روباتیک دارند [۳]. در ساخت و ساز، الگوهای میورا را می‌توان برای ایجاد پوسته‌های غیر قوسی، پوسته‌های قوسی، قطاع گنبد و هسته‌ی سازه‌های ساندویچی استفاده کرد.

در مطالعه‌ای توسط گیلسکی و همکاران [۴]، باربری چهار صفحه‌ی فولادی تا شده، مشتق از الگوهای اورینگامی با استفاده از روش المان محدود در نرم افزار ABAQUS مقایسه شده و الگوهای جعبه تخم مرغی، طولی، هرمی و میورا مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. آن‌ها با حجم مصالح یکسان، سطح یکسانی را پوشش می‌دادند. نتایج حاکی از ایجاد تنش و جابجایی کمتر در سازه با الگوی طولی و سپس الگوی میورا بود. هایمز و همکاران [۵-۷] ساختارهای ساندویچی را که هسته‌ی آن‌ها با الگوی میورا ساخته شده بود، بررسی کردند و آن‌ها را تحت بارهای فشاری، برشی و ضربه‌ای آزمایش کردند. جنس هسته، الیاف کربن یا آرامید بود. گاتاس و همکاران [۸،۹] جذب انرژی و مقاومت در برابر ضربه‌ی سازه‌های ساندویچی منحنی با هسته‌های ساخته شده با استفاده از الگوی میورا را بررسی و آن‌ها را با ساختارهایی با هسته‌های لانه زنبوری دراز مقایسه کردند. در سازه‌های بتنی، کاربرد اورینگامی به دلیل نسبت مقاومت فشاری به جرم کم، مقاومت کششی پایین بتن و لزوم قالب‌گیری تقریباً نادیده گرفته شده است. این موضوع به تکنیک‌ها و مصالح کاربرپسند جدیدی نیاز دارد که به قالب‌های پیچیده نیاز نداشته باشد.

در طول دهه ۱۹۸۰، حذف درشت دانه از بتن و ساخت یک ماتریس سیمانی همگن افزایش یافت، زیرا ضعیف‌ترین نقطه بتن ناحیه‌ی انتقالی بود که در آن سنگ‌دانه و خمیر سیمان به هم می‌رسند. این منطقه مستعد ایجاد ترک‌های ریز است که به مناطق دیگر گسترش می‌یابد و خطر گسیختگی سازه بتنی را به همراه دارد. مطالعات اخیر به توسعه انواع پیشرفته‌ی بتن، مانند بتن با عملکرد فوق العاده بالا (UHPC) (مقاومت فشاری بیش از ۱۲۰ مگاپاسکال [۱۱]) و بتن با عملکرد بالا (HPC) (مقاومت فشاری بیش از ۶۰ مگاپاسکال) منجر شده است [۱۲، ۱۳]. این مواد به دلیل

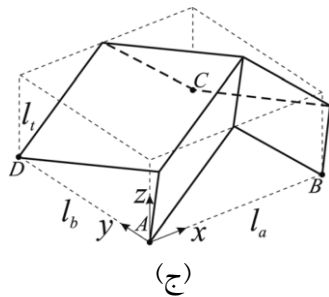
افزایش مقدار سیمان، استفاده از افزودنی‌های شیمیایی در ترکیب خود و نسبت آب به سیمان کم به استحکام خود می‌رسند [۱۳]. الیاف میکرو و ماکرو برای افزایش استحکام کششی بتن و افزایش شکل‌پذیری با کنترل رشد ترک به بتن افزوده می‌شوند. این بتن با استفاده از فوق روان کننده و نسبت آب به سیمان کمتر از ۰/۲۵ ساخته می‌شود [۱]. خواص رئولوژیکی UHPC و HPC در حالت تازه برای قالب‌گیری مطلوب است. آن‌ها خاصیت خود متراکم شدن دارند و به راحتی می‌توان آن‌ها را در قالب ریخت. زمان بندی مناسب و میکسرهای با سرعت بالا در مرحله‌ی اختلاط ضروری است [۱۴-۱۶]. یکی دیگر از مواد کامپوزیت، بتن مسلح به بافته است که ضخامت کم، ظرفیت بارگذاری بالا، انعطاف‌پذیری مناسب و مقاومت در برابر خوردگی از ویژگی‌های آن است. با استفاده از نوع خاصی از بافت می‌توان مقاومت کششی بتن را به میزان قابل توجهی افزایش داد. پارچه‌ی اسپیسر سه بعدی می‌تواند کامپوزیت‌های سیمانی را در جهات مختلف تقویت کرده و آن‌ها را به شکل‌های دلخواه درآورد [۱۷-۱۹]. قربانی و همکاران [۲۰] عملکرد خمشی ملات خود متراکم تقویت شده با پارچه‌ی اسپیسر سه بعدی را مورد مطالعه قرار داد.

تاکنون تحقیقات کمی در مورد استفاده از بتن در سازه‌های اورینگامی انجام شده است. وارد و همکاران [۲۱-۲۳] از الگوی یوشیمورا در مطالعه‌ی خود استفاده کردند. آن‌ها برای ایجاد پوسته‌های خود از صفحات بتنی تا شده استفاده کردند که با شبکه‌ای از الیاف شیشه تقویت شده بودند. آن‌ها با استفاده از این روش چندین عدد از این پوسته‌ها را ساختند. همام و همکاران [۲۴] نتایج اولیه‌ای از یک سری آزمایشی از پوسته‌های نازک با الگوی اورینگامی waterbomb ساخته شده از بتن تقویت شده با منسوجات کربنی ارائه کردند. پوسته‌ها تحت بارگذاری خمشی سه نقطه‌ای آزمایش شدند. این سازه‌ها با تا کردن بتن در حالت تازه با استفاده از قالبی با سطح تاشو ایجاد شدند. محمد صالحی و مستوفی نژاد [۲۵] از بتن کرباسی با عملکرد بالا برای ساختن نمونه‌های اورینگامی در مقیاس کوچک با الگوی میورا استفاده کردند که سازه‌های آن شامل نمونه‌های ساندویچی و غیر ساندویچی بود. آن‌ها یک روش ساده برای مدل‌سازی سازه‌های میورا در ABAQUS ارائه کردند و آن را با استفاده از نتایج تجربی واریسی کردند. شیانگ و همکاران [۲۶] یک مطالعه‌ی پارامتری با استفاده

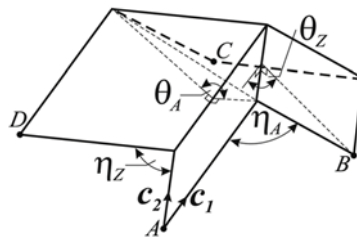
پردازش تصاویر، نحوه‌ی ترک خوردگی و رفتار آن‌ها بررسی شد. در سازه‌های غیر ساندویچی، بتن‌های مورد استفاده شامل بتن کرباسی با عملکرد بالا، بتن کرباسی با عملکرد فوق العاده بالا و بتن الیافی با عملکرد فوق العاده بالا (UHPFRC) بود. در سازه‌ی ساندویچی، هسته با استفاده از بتن کرباسی با عملکرد بالا و صفحات پایینی و بالایی با استفاده از UHPFRC ساخته شده و رفتار آن مورد بررسی قرار گرفت.

۲- مشخصات نمونه‌ها

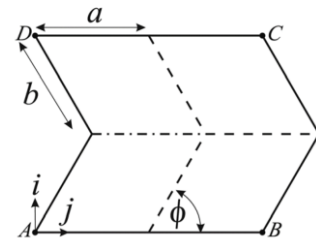
برای یافتن روابط هندسی در الگوهای مشتق شده از الگوی میورا، ابتدا لازم است الگوی پایه‌ی میورا مورد بحث قرار گیرد. الگوی میورا روی صفحه‌ی تا نشده با سه مؤلفه‌ی a, b, ϕ مشخص می‌شود (شکل ۱ الف).



(ج)



(ب)



(الف)

شکل ۱- نمایش الگوی میورا؛ (الف) خطوط و مؤلفه‌های ثابت الگوی میورا؛ (ب) نمایش مؤلفه‌های متغیر الگوی میورا؛ (پ) یک سلول واحد الگوی میورا [۳]

خط مستقیم و j امین خط زیگزاگ است با $V_{i,j}$ نشان داده می‌شود و با استفاده از روابط (۷) تا (۹) و با توجه به شکل ۱ الف، مؤلفه‌های آن در دستگاه کارترین به این صورت به دست می‌آید:

$$x = \begin{cases} (j-1)a \sin(\frac{\eta_A}{2}) & \text{for odd } i \\ (j-1)a \sin(\frac{\eta_A}{2}) + b \cos(\frac{\eta_Z}{2}) & \text{for even } i \end{cases} \quad (۷)$$

$$y = (i-1)b \sin(\eta_Z / 2) \quad (۸)$$

$$z = \begin{cases} 0 & \text{for odd } j \\ a \cos(\eta_A / 2) & \text{for even } j \end{cases} \quad (۹)$$

به طور خلاصه می‌توان بیان داشت دوازده مؤلفه‌ی $a, b, \phi, m, n, \theta_A, \theta_Z, \eta_A, \eta_Z, l_a, l_b, l_t$ برای تعریف الگوی میورا تعریف می‌شود. هفت مؤلفه‌ی اول متغیرهای الگو نامیده می‌شوند؛ چون وابسته به شکل تا شده‌اند. پنج مؤلفه‌ی آخر ثابت‌های الگو نامیده می‌شوند؛ چون فارغ از شکل تا شده ثابت

از نرم افزار ABAQUS از صفحات ساندویچی مستطیلی با هسته‌ی چین خورده میورا ارائه کرد. پایدا و همکاران [۲۷] صفحات ساندویچی هیبریدی دو هسته‌ای (لانه زنبوری- میورا) محافظ سپر در برابر بارهای انفجار را با مدل‌سازی آن‌ها در نرم افزار بررسی کردند.

یکی از مزایای استفاده از اورینگامی عدم نیاز به قالب پیچیده است. در تحقیقات گذشته استفاده از الگوهای اورینگامی به ویژه الگوی میورا در ساخت سازه‌های بتنی در مقیاس بزرگ، بررسی رفتار آن‌ها مغفول مانده است. همچنین ساخت این سازه‌ها با استفاده از انواع جدید بتن مانند بتن کرباسی انجام نشده است. در این تحقیق سازه‌های ساندویچی و غیر ساندویچی میورا در مقیاس بزرگ با سه نوع بتن ساخته شد. سازه‌ها تحت آزمایش خمشی چهار نقطه‌ای قرار گرفتند. با تصویربرداری از این سازه‌ها در هنگام بارگذاری و

چهار مؤلفه‌ی زوایای بین صفحه‌ای θ_A و θ_Z و زوایای بین لبه‌ای η_Z و η_A برای تعیین هندسه‌ی شکل تا شده لازم است (شکل ۱ ب و ج). در این الگو شش رابطه‌ی زیر بین مؤلفه‌ها برقرار است:

$$(1 + \cos \eta_Z)(1 - \cos \eta_A) = 4 \cos^2 \phi \quad (۱)$$

$$\cos \eta_A = \sin^2 \phi \cos \theta_Z - \cos^2 \phi \quad (۲)$$

$$\cos \eta_Z = \sin^2 \phi \cos \theta_A + \cos^2 \phi \quad (۳)$$

$$l_a = 2a \sin(\eta_A/2) \quad (۴)$$

$$l_b = 2b \sin(\eta_Z/2) \quad (۵)$$

$$l_t = a \cos(\eta_A/2) \quad (۶)$$

به وسیله‌ی مؤلفه‌های فوق می‌توان مکان همه‌ی رئوس را در هر حالت تا شده به دست آورد. با فرض تعداد خطوط مستقیم m و تعداد خطوط زیگزاگ n ، مکان رئوس که محل تقاطع i امین

می‌مانند. در این میان شش رابطه‌ی هندسی مستقل (۱) تا (۶) بیان شد. بنا بر این، شش مؤلفه‌ی مستقل نیاز است تا تمام مؤلفه‌های یک الگوی منحصر به فرد الگوی میورا تعیین شوند. در یک الگوی مشخص میورا با داشتن پنج ثابت الگو و یکی از متغیرهای الگو می‌توان شش مؤلفه‌ی دیگر را تعیین کرد. جدول ۱ مشخصات هندسی نمونه‌های ساخته شده در این تحقیق را نشان می‌دهد. علت انتخاب این مقادیر محدودیت‌های ابعاد در دستگاه تست خمش و تنظیم اندازه‌ها به طوری که از فضا به درستی استفاده شود بود.

جدول ۱- مشخصات هندسی نمونه‌ی بزرگ مقیاس میورا

a (mm)	b (mm)	ϕ (deg)	θ_A (deg)	η_A (deg)	η_Z (deg)	l_i (mm)	l_a (mm)	l_b (mm)
۴۰۰	۴۰۰	۶۰	۷۸	۷۳	۶۵/۶	۳۲۲	۴۷۶	۴۳۲

نمونه‌ها شامل یک سازه‌ی ساندویچی و سه سازه غیر ساندویچی بود. سازه‌ها تحت آزمایش خمش چهار نقطه‌ای قرار گرفتند. با تصویربرداری از سازه‌ها در هنگام بارگذاری و پردازش تصاویر، نحوه‌ی ترک خوردگی بررسی شد. نمونه‌های بزرگ با استفاده از سه نوع مختلف بتن ایجاد شدند: بتن کرباسی با عملکرد بالا (HC)، بتن کرباسی با عملکرد فوق‌العاده بالا (UC)، و بتن الیافی با عملکرد فوق‌العاده بالا (UHPFRC). جدول ۲ مشخصات و نامگذاری نمونه‌ها را خلاصه می‌کند.

جدول ۲- اسامی و مشخصات نمونه‌ها

M-HC	نمونه‌ی میورای ساخته شده با بتن HC
M-UC	نمونه‌ی میورای ساخته شده با بتن UC
M-UHPFRC	نمونه‌ی میورای ساخته شده با UHPFRC
SM	نمونه‌ی ساندویچی با هسته‌ی ساخته شده از بتن HC و صفحات ساخته شده از UHPFRC

۳- مصالح و طرح‌های اختلاط بتن

مصالح مورد استفاده در طرح اختلاط بتن شامل سیمان پرتلند با ترکیب نشان داده شده در جدول ۳، ماسه سیلیسی با دانه بندی نشان داده شده در جدول ۴، فوق روان کننده پلی کربوکسیلات و آب می‌باشد. بتن ساخته شده مانند یک عسل روان جاری می‌شود. با تغییر نسبت این مواد، بتن‌هایی با مقاومت‌های مکانیکی متفاوت ساخته شد و از الیاف یا پارچه‌ی سه بعدی برای افزایش مقاومت کششی و شکل پذیری آن‌ها استفاده شد. در بتن‌های HC و UC از پارچه اسپیسر سه بعدی با مشخصاتی مطابق جدول ۵ استفاده شد. ۰/۵ درصد حجمی از الیاف پلی پروپیلن (PP) به طول ۱۲ میلی متر و ۱ درصد حجمی الیاف فولادی قلابدار ۳۰ میلی متری در طرح اختلاط UHPFRC استفاده شد.

جدول ۳- ترکیبات سیمان اصفهان تیپ ۱-۳۲۵

ترکیبات	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃
درصد	۲۱/۸۶	۵/۴۷	۶۱/۰۱	۳/۴۰	۲/۳۳	۰/۲۷	۰/۵۸	۲/۳۴

جدول ۴- دانه بندی ماسه سیلیسی

اندازه الک (mm)	۲/۳۵	۱/۱۸	۰/۶	۰/۳	۰/۱۵	۰/۰۷۵
درصد رد شده از الک	۹۹/۳۶	۸۹/۸۳	۷۴/۴۷	۵۹/۸۴	۳۴/۵۹	۱۶/۵۱

جدول ۵- مشخصات پارچه‌ی سه بعدی

شکل پارچه	مقاومت کششی (MPa)	جنس	مساحت سوراخ (mm ²)	ضخامت (mm)	جرم (gr/m ²)
	۱/۸	پلی استر	۴۱	۱۱	۶۰۹

سیمان، نیمی از ماسه سیلیسی، آب و فوق روان کننده به مدت ۷ دقیقه مخلوط شدند. سپس ماسه‌ی باقیمانده به تدریج به مخلوط اضافه شد و اختلاط به مدت ۵ دقیقه ادامه یافت تا مخلوطی یکنواخت با سیالیت بالا حاصل شود. در این مرحله در طرح‌های حاوی الیاف، الیاف فولادی اضافه شد و پس از ۲ دقیقه هم زدن، الیاف PP نیز به تدریج به مخلوط اضافه شد. پس از سه دقیقه هم زدن، مخلوط آماده قالب گیری بود. جدول ۶ نسبت مواد مورد استفاده در ساخت بتن‌های مختلف را نشان می‌دهد.

جدول ۶- نسبت مصالح در بتن‌های مختلف

الیاف	3D spacer	فوق روان کننده	آب	ماسه سیلیسی	سیمان	
x	✓	۰/۰۱	۰/۳۵	۱	۱	HC
x	✓	۰/۰۲	۰/۱۷۵	۱	۱	UC
✓	x	۰/۰۲	۰/۱۷۵	۱	۱	UHPFRC

۴- خواص مکانیکی بتن کرباسی و UHPFRC

آزمایش مقاومت فشاری بر روی استوانه‌های بتنی ۱۰۰×۲۰۰ میلی متر با سرعت ۱/۰ مگاپاسکال بر ثانیه انجام شد. از آن جایی که هیچ آیین نامه‌ی تأیید شده‌ای برای انجام آزمایش‌های خمشی بر روی کامپوزیت‌های پایه سیمانی تقویت شده با پارچه [۲۰] وجود ندارد، ابعاد نمونه‌های خمشی بر اساس ضخامت پارچه، قابلیت‌های تجهیزات و دقت ثبت بار برای به حداقل رساندن خطا انتخاب شدند. مقاومت خمشی با استفاده از آزمایش خمشی چهار نقطه‌ای منشورهای ۳۵۰ × ۱۰۰ × ۱۱ میلی متر تحت پروتکل کنترل-جایجایی با سرعت ۱/۰ میلی متر در دقیقه اندازه گیری شد. ارتفاع نمونه‌ها با ضخامت پارچه مطابقت داشت و دهانه تیر ۳۰۰ میلی متر بود. از آن جایی که آیین نامه‌های تأیید شده کمی برای تعیین ابعاد نمونه‌ی کششی و سرعت تست [۲۰] وجود دارد، ابعاد برای تست کشش مستقیم بر اساس قابلیت‌های تجهیزات و ضخامت پارچه انتخاب شد. نمونه‌های کششی منشورهای ۳۵۰ × ۷۰ × ۱۱ میلی متر با صفحات فلزی چسبانده شده به دو انتهای نمونه با استفاده از رزین اپوکسی برای کاهش آسیب موضعی بودند (شکل ۲).

تست مقاومت کششی ۲۸ روزه با سرعت ۱/۵ میلی متر در دقیقه انجام شد. جدول ۷ مشخصات مکانیکی بتن را نشان می‌دهد.



شکل ۲- نمونه کششی

جدول ۷- مقاومت مکانیکی ۲۸ روزه بتن‌های مختلف

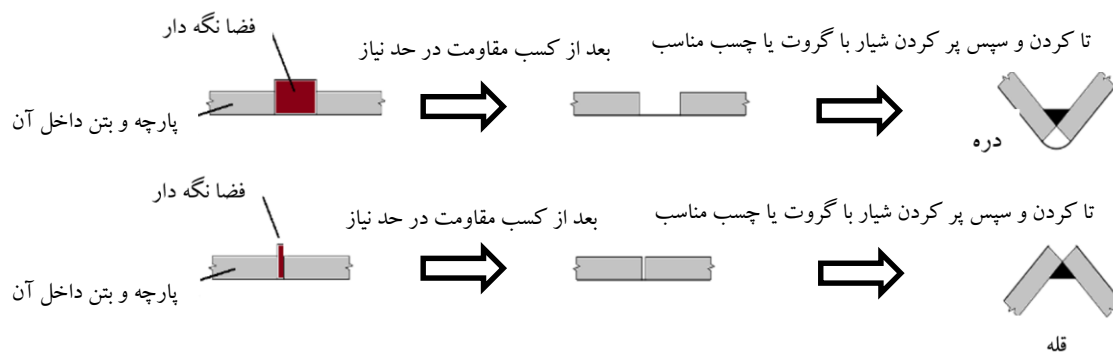
(f_t) مقاومت کششی	(f_r) مقاومت خمشی	(f_c') مقاومت فشاری	
۳/۶	۴/۹	۶۱	HC
۷/۳	۱۱/۱	۱۲۰	UC
۷/۸	۱۴/۸	۱۲۰	UHPFRC

۵- ساخت نمونه‌های اورینگامی

نگهدار از میان پارچه خارج شده و پس از عمل آوری و تا کردن صفحات، با استفاده از گروت اپوکسی شیارها پر می‌شوند تا شکل نهایی به دست آید. گروت مورد استفاده شامل ۷۰ درصد ماسه سیلیسی و ۳۰ درصد چسب اپوکسی کوانتوم EPR3301 با مقاومت چسبندگی به بتن ۲/۵ مگاپاسکال بود.

مراحل ساخت نمونه‌های ساخته شده با بتن کرباسی شامل نمونه‌های M-HC و M-UC و هسته‌ی نمونه‌ی SM در شکل ۴ نمایش داده شده است. پرشدگی شیار با گروت به اندازه‌ای بود که گروت در طول شیار حدود ۳/۵ سانتی متر با صفحه‌ی بتنی در تماس باشد.

الگوی میورای مورد نظر با پهن کردن پارچه سه بعدی و ایجاد شیارها روی آن اجرا می‌شود. در نظر گرفتن این که صفحه‌ی بتن کرباسی بر روی قله یا در یک دره قرار گرفته، ضروری است. قله‌ها دارای شیارهای باریک و دره‌ها دارای شیارهای پهن هستند (شکل ۳). بتن مورد استفاده در ساخت نمونه‌ها باید روانی بالایی داشته باشد و به راحتی از سوراخ پارچه‌ی سه بعدی گذشته و به طور افقی در پارچه پخش شود و نیازی به ویریه نداشته باشد. با قرار دادن فضا نگهدار در شیارها، بتن ریزی انجام و پس از ۴۸ ساعت فضا



شکل ۳- چگونگی تا زدن پارچه‌ی سه بعدی (حالت دره و قله)



(ب) بتن ریزی در پارچه



(الف) پهن کردن پارچه‌ی سه بعدی و قرار دادن فضا نگه دار در شیارها



(ج) تا کردن صفحات بتنی و گروت ریزی داخل شیارها

شکل ۴- مراحل ساخت نمونه‌ی بزرگ مقیاس بتن کرباسی

به هسته متصل شدند. همچنین برای اطمینان از عدم لغزش بین صفحات و هسته، از گروت اپوکسی نیز استفاده شد (شکل ۷).



شکل ۷- اتصال صفحه‌ی زیرین به هسته با پیچ

۶- نحوه‌ی انجام آزمایش و نتایج

در نمونه‌های غیر ساندویچی محل اعمال بار با استفاده از گروت سیمانی مسطح و تراز شد. بارگذاری به صورت جا به جایی کنترل و با سرعت ۱ میلی متر بر دقیقه به نمونه‌ها اعمال و با نصب جا به جایی سنج در دو نقطه از نمونه، جا به جایی اندازه گیری شد. فاصله‌ی مرکز تا مرکز استوانه‌های تکیه گاه و استوانه‌های اعمال بار به ترتیب ۱۳۰ و ۴۳ سانتی متر بود (شکل ۸). همچنین با عکس‌برداری از نمونه‌ها حین انجام آزمایش، تصاویر لازم برای پردازش تصویر (DIC)^۱ به دست آمد و روند گسترش ترک خوردگی و محل ایجاد ترک‌ها بررسی شد. پردازش تصویر این عکس‌ها به وسیله نرم افزار GOM انجام گرفت.



شکل ۸- آزمایش خمش چهار نقطه‌ای نمونه‌های بزرگ مقیاس

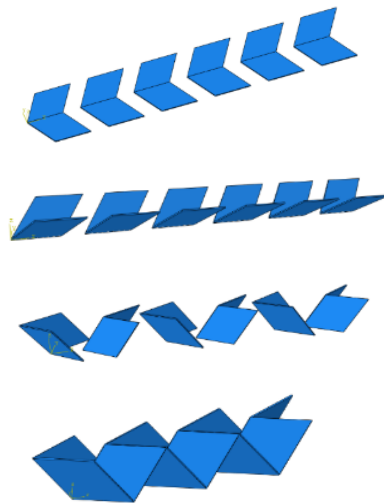
۶-۱- نمونه‌ی M-HC

شکل ۹ نمودار بار-تغییر مکان نمونه‌ی M-HC را نشان می‌دهد. رفتار این نمونه تا بار ۱۶۰۰ نیوتن به صورت خطی است. پس از آن با ایجاد اولین ترک رفتار سازه غیر خطی می‌شود و با رسیدن بار به ۵۶۱۰ نیوتن، باربری دچار افت می‌شود. سپس باربری دوباره افزایش یافته و با رسیدن بار به ۵۸۲۰ نیوتن، تغییر شکل تحت بار تقریباً ثابت ادامه پیدا می‌کند.

نمونه‌ی M-UHPFRC به صورت موزاییکی ساخته شد. ابتدا یک صفحه‌ی بزرگ با استفاده از UHPFRC و ضخامت حدود ۱۱ میلی متر (مانند ضخامت پارچه) ساخته و با برش، متوازی الاضلاع‌های یکسان با مشخصات هندسی مانند قبل ایجاد شد (شکل ۵). این متوازی الاضلاع‌ها با قرار گرفتن در زوایای مناسب در کنار هم و سپس پر کردن دره‌ها (شیارها) با گروت اپوکسی، سازه‌ی میورای نهایی را ایجاد کردند (شکل ۶).



شکل ۵- صفحه‌ی یکپارچه‌ی UHPFRC

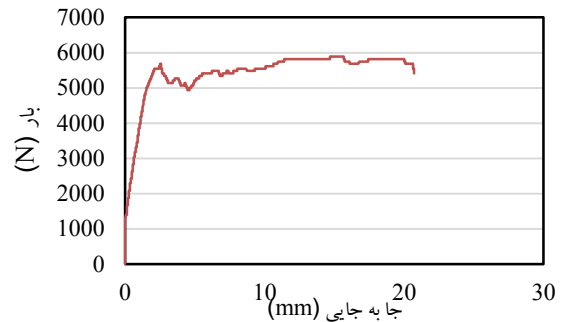


شکل ۶- مراحل ساخت نمونه‌ی بزرگ مقیاس M-UHPFRC

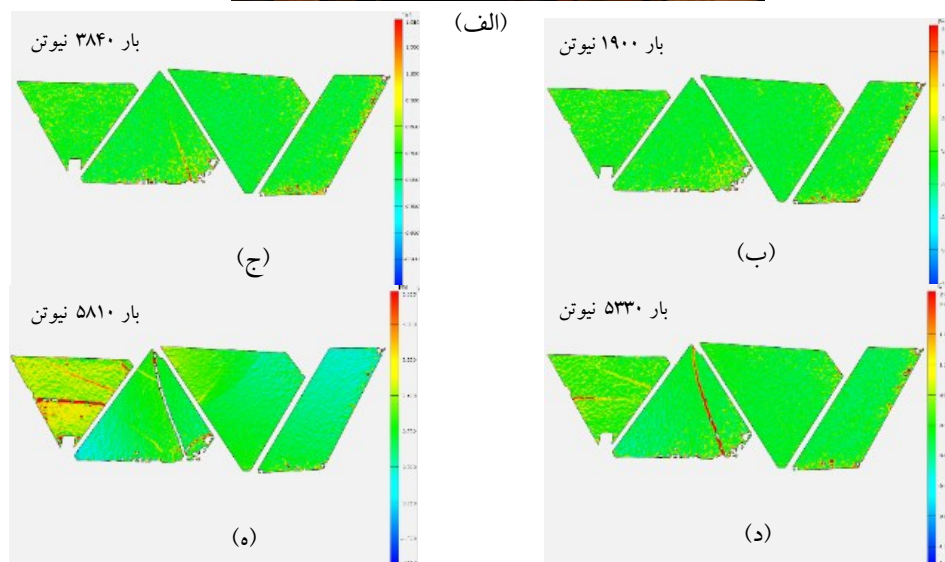
در نمونه‌ی ساندویچی (SM)، هسته‌ی میورا همانند نمونه‌ی M-HC با بتن پارچه‌ای ساخته شده ولی صفحات بالایی و پایینی با استفاده از بتن UHPFRC ساخته شد. علت عدم ساخت این صفحات با بتن پارچه‌ای این بود که با توجه به بحرانی بودن برش در تکیه گاه‌ها و وجود بازشو، نیاز به مقاومت برشی بالاست. این مقاومت برشی با پارچه ایجاد نمی‌شود ولی الیاف فولادی می‌تواند این ظرفیت را تأمین کند. این صفحات به وسیله پیچ‌های ۸.۸ با قطر ۲۰ میلی متر

^۱ Digital Image Correlation

با پردازش تصویر نمونه حین بارگذاری، روند گسترش ترک‌ها در صفحه‌های بحرانی در شکل ۱۰ نمایش داده شده است. مطابق این شکل، متناظر با بار ۱۹۰۰ نیوتن، نشانه‌های اولین ترک در تصویر ثبت شده است. با رسیدن بار به ۳۸۴۰ نیوتن، این ترک بازتر شده و در بار ۵۳۳۰ نیوتن، صفحه‌ی مجاور که تا پیش از این ترکی در آن مشاهده نمی‌شد آسیب دیده و در حوالی این بار است که نمودار بار-تغییر مکان افت می‌کند. پس از آن باربری افزایش یافته و در بار ۵۸۱۰ نیوتن ترک‌های جدیدی ایجاد می‌شود.

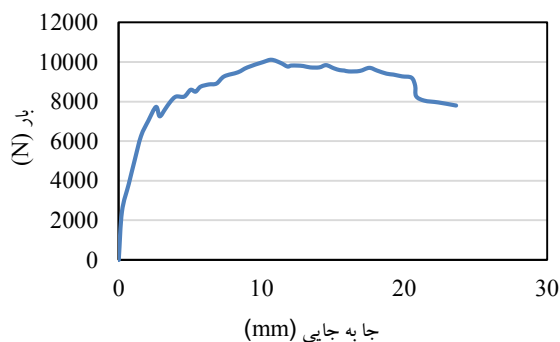


شکل ۹- نمودار بار-تغییر مکان نمونه‌ی M-HC



شکل ۱۰- مراحل ایجاد ترک‌ها در نمونه‌ی M-HC

حدوداً در این لحظه است که نمودار شکل ۱۱ غیر خطی می‌شود.

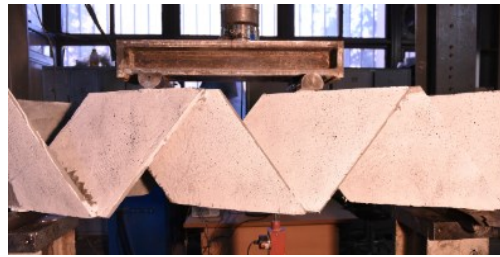


شکل ۱۱- نمودار بار-تغییر مکان نمونه‌ی M-UC

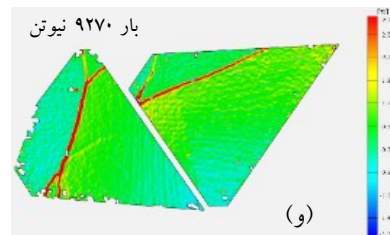
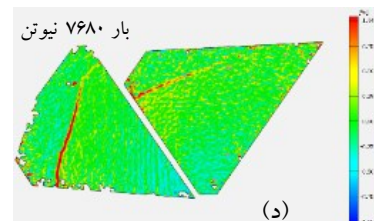
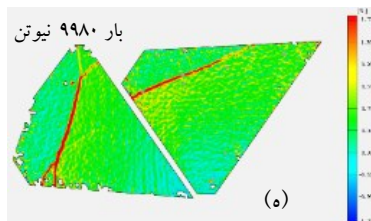
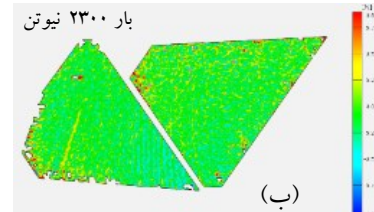
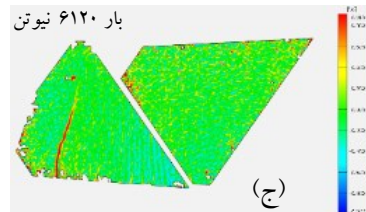
۲-۶- نمونه‌ی M-UC

شکل ۱۱ نمودار بار-تغییر مکان نمونه‌ی M-UC را نشان می‌دهد. رفتار این نمونه تا بار ۲۴۰۰ نیوتن به صورت خطی است. پس از آن رفتار سازه غیر خطی و با رسیدن بار به ۷۷۳۰ نیوتن، باربری دچار افت می‌شود. سپس باربری دوباره افزایش یافته و با رسیدن بار به ۱۰۱۱۰ نیوتن، تغییر شکل تحت بار تقریباً ثابت ادامه پیدا می‌کند. با پردازش تصویر نمونه حین بارگذاری، روند گسترش ترک‌ها در وجه‌های نمونه در شکل ۱۲ نمایش داده شده است. مطابق این شکل، متناظر با اولین ترک، ۲۳۰۰ نیوتن، در وضوح در تصویر مشخص می‌شود.

با رسیدن بار به ۷۶۸۰ نیوتن، این ترک بازتر شده و هم‌چنین اولین ترک در چپ چند شاخه شده و تغییر شکل تحت بار تقریباً ثابت ادامه می‌یابد. شکل وجه مجاور مشاهده می‌شود. با رسیدن بار به ۹۹۸۰ نیوتن، ترک وجه سمت آخر نیز گسترش الگوی ترک‌ها در اواخر بارگذاری را نشان می‌دهد.



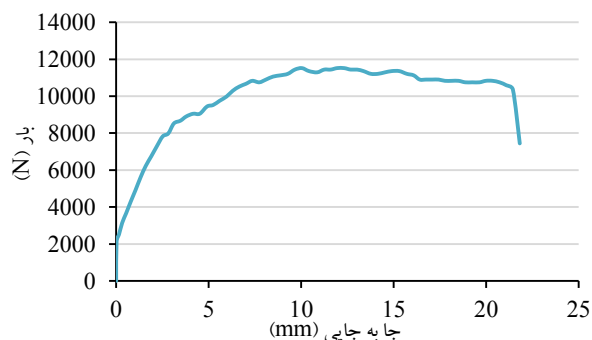
(الف)



شکل ۱۲- روند گسترش ترک‌ها در نمونه‌ی M-UC تحت بارگذاری

۳-۶- نمونه‌ی M-UHPFRC

قبل ایجاد شده و در وجه کناری نیز ترک خوردگی رخ می‌دهد. در حوالی بار ۱۱۴۳۰ نیوتن، در وجه دوم از سمت چپ نیز ترک خوردگی ایجاد می‌شود. شکل آخر نیز گسترش الگوی ترک‌ها در اواخر بارگذاری را نشان می‌دهد.

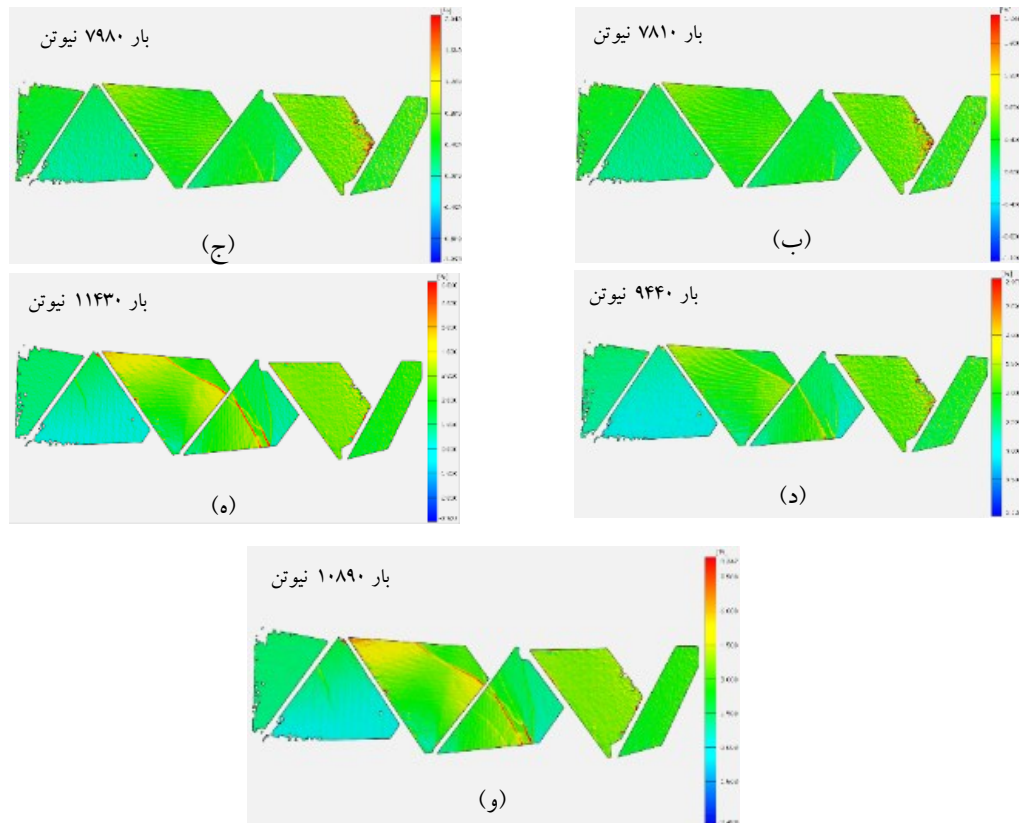


شکل ۱۳- نمودار بار-تغییر مکان نمونه‌ی M-UHPFRC

شکل ۱۳ نمودار بار-تغییر مکان نمونه‌ی M-UHPFRC را نشان می‌دهد. رفتار این نمونه تا بار ۲۵۰۰ نیوتن به صورت خطی است. پس از آن رفتار سازه غیر خطی شده و با رسیدن بار به ۷۸۲۰ نیوتن، سختی سازه دچار افت بیش‌تری می‌شود. سپس باربری دوباره افزایش یافته و با رسیدن بار به ۱۱۵۳۰ نیوتن، تغییر شکل تحت بار تقریباً ثابت ادامه پیدا می‌کند. با پردازش تصویر نمونه حین بارگذاری، روند گسترش ترک‌ها در وجه‌های نمونه در شکل ۱۴ نمایش داده شده است. مطابق این شکل، متناظر با بار ۷۸۱۰ نیوتن، اولین ترک به وضوح در تصویر مشخص می‌شود. با اندکی افزایش بار، ترک دوم در بار ۷۹۸۰ نیوتن رخ می‌دهد. در همین حدود بار است که سختی نمودار بار-تغییر مکان کم‌تر می‌شود. با افزایش بار به ۹۴۴۰ نیوتن، ترکی به موازات ترک



(الف)



شکل ۱۴- روند گسترش ترک‌ها در نمونه‌ی M-UHPFRC تحت بارگذاری

در جدول ۸ با در نظر گرفتن صفحه‌ی بتن پارچه‌ای معادل نمونه‌های اورینگامی که مساحت یکسانی را پوشش می‌دهد و با استفاده از رابطه‌ی $R = PL/bd^2$ که برای تیر تحت خمش چهار نقطه‌ای است، تأثیر الگوی میورا بر باربری نشان داده شده است. با توجه به این که در فاصله‌ی بین دو تکیه گاه، ۸ عدد متوازی الاضلاع کامل و حدود ۴ قطعه نصفه‌ی متوازی الاضلاع با مشخصات جدول ۱ و به ضخامت ۱۱ میلیمتر وجود دارد، ضخامت (d)، عرض (b) و طول دهانه‌ی (L) این صفحه‌ی معادل برابر ۲۵/۹، ۴۳۲ و ۱۳۰۰ میلی متر به دست می‌آید. مشخصات مقاومت خمشی (R) مطابق نتایج آزمایش بتن‌های مختلف در جدول ۷ انتخاب می‌شود. طبق نتایج جدول ۸ با افزایش مقاومت خمشی بتن مورد استفاده در ساخت نمونه‌ها (بتن پارچه‌ای یا

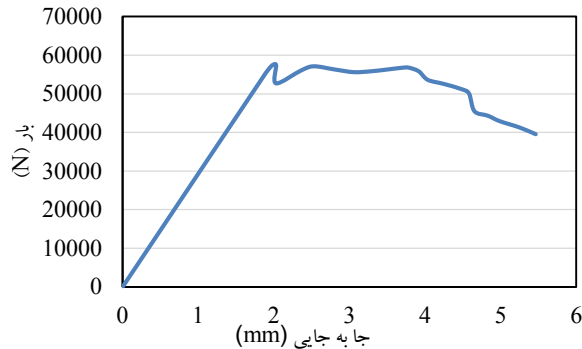
UHPFRC)، نسبت $P_{max \text{ Miura}}/P_{max \text{ plate}}$ کاهش می‌یابد که این نشان دهنده‌ی کاهش اثر الگوی میورا در باربری سازه‌ی ساخته شده از مصالح با مقاومت خمشی بیشتر است. نام گذاری صفحات معادل به این صورت است که نام نمونه‌ی میورا و بتن آن (به عنوان مثال M-HC) در کنار عبارت EV قرار گرفته است.

جدول ۸ - مقایسه‌ی حداکثر باربری نمونه‌های اورینگامی بزرگ مقیاس با صفحات بتن پارچه‌ای معادل آن‌ها

صفحات معادل	$P_{max \text{ plate}} \text{ (N)}$ (محاسباتی)	$P_{max \text{ Miura}}/P_{max \text{ plate}}$
EVM-HC	۱۰۹۲	۵/۳
EVM-UC	۲۴۷۴	۴/۰۹
EVM-UHPFRC	۳۲۹۹	۳/۴۹

۶-۴- نمونه‌ی ساندویچی

بارگذاری را نشان می‌دهد. طبق این تصویر غیر از ترک‌های ابتدایی ترک دیگری در هسته رخ نداده که این نشان دهنده‌ی این است که نقش اساسی در باربری این سازه‌ی ساندویچی بر عهده‌ی صفحات بالایی و پایینی است.



شکل ۱۵- نمودار بار-تغییر مکان نمونه‌ی SM

شکل ۱۵ نمودار بار-تغییر مکان نمونه‌ی SM را نشان می‌دهد. رفتار این نمونه تا بار ۵۵۰۰۰ نیوتن به صورت خطی است. پس از آن رفتار سازه غیر خطی شده و با رسیدن بار به ۵۷۴۹۰ نیوتن، باربری کمی افت کرده و مجدداً افزایش می‌یابد. با افزایش آسیب در صفحه‌ی زیرین (صفحه‌ی کششی)، تغییر مکان تحت بار تقریباً ثابت افزایش یافته و پس از مدتی باربری کاهش چشمگیری پیدا می‌کند. با پردازش تصویر نمونه حین بارگذاری، روند گسترش ترک‌ها در هسته‌ی نمونه در شکل ۱۶ نمایش داده شده است. مطابق این شکل، متناظر با بار ۲۰۱۰۰ نیوتن، اولین ترک در هسته به وضوح در تصویر مشخص می‌شود. با افزایش بار تا بار حداکثر (۵۷۴۹۰ نیوتن)، این ترک بازتر می‌شود. شکل آخر نیز اواخر



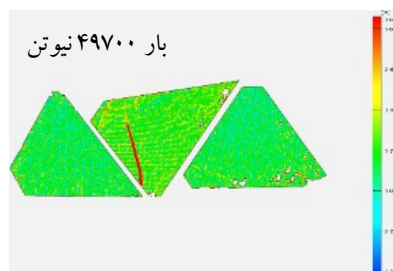
(الف)



(ج)



(ب)



(د)

شکل ۱۶- روند گسترش ترک‌ها در هسته‌ی نمونه‌ی SM تحت بارگذاری

۷- نتیجه‌گیری

بررسی قرار گرفت. این سازه‌ها با استفاده از بتن کرباسی با عملکرد بالا و فوق العاده بالا و UHPFRC ساخته شدند. همچنین از ساختار میورا به عنوان هسته‌ی یک سازه‌ی ساندویچی استفاده شد.

در این تحقیق، سازه‌های اوریگامی در مقیاس بزرگ با الگوی میورا ساخته شده و رفتار آن‌ها تحت بارگذاری چهار نقطه‌ای مورد

Edinburgh, 2009.

[7] Heimbs, S., "Foldcore sandwich structures and their impact behaviour: an overview," in *Dynamic failure of composite and sandwich structures*, ed Springer, 2013, pp. 491-544.

[8] Gattas, J. M. and You, Z., "Quasi-static impact response of single-curved foldcore sandwich shells", in *ASME 2014 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, 2015.

[9] Gattas, J. M., Wu, W., and You, Z., "Miura-base rigid origami: parameterizations of first-level derivative and piecewise geometries," *Journal of Mechanical Design*, 135 (2013) 111011.

[10] Fischer, S., Heimbs, S., Kilchert, S., Klaus, M., and Cluzel, C., "Sandwich structures with folded core: manufacturing and mechanical behavior," in *International SAMPE Europe Conference*, Paris, 2009.

[11] De Larrard, F. and Sedran, T., "Mixture-proportioning of high-performance concrete," *Cem. Concr. Res.* 32 (2002) 1699-1704.

[12] Prejs, A., Jawdhari, A. and Fam, A., "Pull-out strength of post-installed connectors in thin UHPC members," *Thin-Walled Structures*. 181 (2022) 110023.

[13] Kadhim, M.M., Jawdhari, A. and Peiris, A., "Development of hybrid UHPC-NC beams: A numerical study," *Eng. Struct.* 233 (2021) 111893.

[14] Bahmani, H., Mostofinejad, D., and Dadvar, S. A., "Mechanical properties of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete containing synthetic and mineral fibers," *ACI Mater. J.* 117 (2020) 155-168.

[15] Mostofinejad, D., Nikoo, M. R., and Hosseini, S. A., "Determination of optimized mix design and curing conditions of reactive powder concrete (RPC)," *Constr. Build. Mater.* 123 (2016) 754-767.

[16] Mostofinejad, D. and Nozhati, M., "Prediction of the modulus of elasticity of high strength concrete," *Iran. J. Sci. Technol. B* 29 (B3), 311-321. 2005.

[17] Han, F., Chen, H., Jiang, K., Zhang, W., Lv, T., and Yang, Y., "Influences of geometric patterns of 3D spacer fabric on tensile behavior of concrete canvas," *Constr. Build. Mater.* 65 (2014) 620-629.

[18] Zhang, F., Chen, H., Li, X., Li, H., Lv, T., Zhang, W., and Yang, Y., "Experimental study of the mechanical behavior of FRP-reinforced concrete canvas panels," *Compos. Struct.* 176 (2017) 608-616.

[19] Naaman, A., "Evolution in ferrocement and thin reinforced cementitious composites," *Arabian J. Sci. Eng.* 37 (2012) 421-441.

[20] Ghorbani, V., Jeddi, A. A. A., Dabiryan, H.,

بر اساس نتایج آزمایش‌ها می‌توان موارد زیر را نتیجه گرفت:

۱- با استفاده از الگوی اورینگامی میورا و مصالح جدید مانند بتن کرباسی با عملکرد بالا و UHPFRC می‌توان سازه‌ای بدون قالب گیری پیچیده با ظرفیت باربری و شکل پذیری مناسب و زیبا از نظر معماری ساخت.

۲- مقایسه سازه‌های میورا و صفحات مسطح معادل آن‌ها نشان می‌دهد که مدل میورا افزایش ظرفیت باربری در سازه‌های ساخته شده با بتن کرباسی با عملکرد بالا، بتن کرباسی با عملکرد فوق العاده بالا و UHPFRC، به ترتیب به میزان ۴/۳، ۳/۱ و ۲/۵ برابر را ایجاد می‌کند.

۳- در سازه‌ی ساخته شده از بتن کرباسی ترک‌های کم ولی عمیق و در سازه‌های ساخته شده با UHPFRC ترک‌های زیاد و با عمق کمتر ایجاد می‌شود.

۴- ساخت سازه ساندویچی با هسته میورا و صفحات UHPFRC ظرفیت بار را به ترتیب ۸/۹ و ۴ برابر نسبت به نمونه‌های M-HC و M-UHPFRC افزایش داد و بیشتر باری که به صورت خمشی در سازه‌های ساندویچی ایجاد می‌شود توسط صفحات فوقانی و تحتانی تحمل می‌شود.

۸- مراجع

[1] Miura, K., "Method of packaging and deployment of large membranes in space," in *Proceedings of 31st Congress of International Astronautics Federation (IAF-80- A31)*, Tokyo, Japan, 1980.

[2] Nishiyama, Y., "Miura Folding: Applying Origami to Space Exploration," *Int. J. Pure. Appl. Math.* 79 (2012) 269-279.

[3] Gattas, J. M. and You, Z., "Geometric assembly of rigid-foldable morphing sandwich structures," *Eng. Struct.* 94 (2015) 149-159.

[4] Gilewski, W., Pelczyński, J., and Stawarz, P., "A comparative study of origami-inspired folded plates," *Procedia Eng.* 91 (2014) 220-225.

[5] Heimbs, S., Cichosz, J., Klaus, M., Kilchert, S., and Johnson, A., "Sandwich structures with textile-reinforced composite foldcores under impact loads," *Compos. Struct.* 92 (2010) 1485-1497.

[6] Heimbs, S., Cichosz, J., Kilchert, S., and Klaus, M., "Sandwich panels with cellular cores made of folded composite material: mechanical behaviour and impact performance," in *17th international conference on composite materials (ICCM-17)*,

and Ramezaniapour, A. A., "Investigation of the flexural behavior of self-consolidating mortars reinforced with net warp-knitted spacer fabrics," *Constr. Build. Mater.* 232 (2020) 117270.

[21] Woerd, J. D. v. d., Chudoba, R., and Hegger, J., "Folded bike shelter: Application of oricrete design and manufacturing method," in *Proceedings of IASS Annual Symposia*, (2016) 1-10.

[22] Woerd, J. D. v. d., Chudoba, R., and Hegger, J., "Single-curved shell structure made out of textile-reinforced concrete plate using a folding technique," in *Proceedings of IASS Annual Symposia*, (2013) 1-6.

[23] Woerd, J. D. v. d., "Eine Methodik zur Realisierung dünnwandiger Faltwerke aus zementbasierten Verbundwerkstoffen durch Faltung" Dissertation, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, 2018.

[24] Spartali, H., Hegger, J. and Chudoba, R., "Structural behaviour of origami-based folded shells made of carbon textile reinforced concrete", *Universitätsbibliothek der RWTH Aachen*, 2023.

[25] Mohammadsalehi, A. and Mostofinejad, D., "Behavior of high-performance concrete canvas miura-origami structures under flexural loading," *Structures*, 54 (2023) 928-945.

[26] Xiang, X.M., You, Z. and Lu, G., "Rectangular sandwich plates with miura-ori folded core under quasi-static loadings," *Composite Structures*, 195 (2018) 359-374.

[27] Pydah, A. and Batra, R., "Blast loading of bumper shielded hybrid two-core Miura-ori/honeycomb core sandwich plates," *Thin-Walled Structures*, 129 (2018) 45-57.

Investigating the behavior of large-scale origami concrete structures with Miura pattern under flexural load

Ali Mohammadsalehi *

Department of Civil Engineering, Isfahan University of Technology (IUT), Isfahan, 84156-83111.

Davood Mostofinejad

Department of Civil Engineering, Isfahan University of Technology (IUT), Isfahan, 84156-83111.

Abstract

Engineers are often interested in creating structures with unique and innovative architecture. One of the challenges in making these structures is the difficulty in using specific materials and achieving the desired shape. In this research, large-scale structures were built using Miura's origami pattern, high and ultra-high-performance canvas concrete, and ultra-high-performance fiber-reinforced concrete to solve these challenges. The performance of structures under flexural load was evaluated. Three non-sandwich structures and one sandwich structure were built. Non-sandwich structures were made using high-performance canvas concrete, ultra-high-performance fiber-reinforced concrete (UHPFRC), and ultra-high-performance canvas concrete. Using the Miura pattern in these specimens enhanced the load capacity of the structures by 2.5 to 4.3 times in the same conditions. Also, the behavior of a sandwich structure with an origami core was made with high-performance canvas concrete and upper and lower plates with UHPFRC was investigated, which showed an increase of 4 and 9.8 times the load capacity compared to non-sandwich structures.

Keywords: Miura patterns; Origami structures; Sandwich structure; Ultra-high-performance fiber reinforced concrete (UHPFRC); Ultra-high-performance canvas concrete; High-performance canvas concrete.

* Corresponding Author a.mohammadsalehi@cv.iut.ac.ir