



Journal of Structural and Construction Engineering

www.jsce.ir



Introducing a Novel Interlocking Block and Experimental Study on In-plane and Out-of-plane Behavior and Strength of its Prisms Specimens

Vahid Baneshi¹, Seyed Mahdi Dehghan^{2*}

1- PhD student in Earthquake Engineering, Faculty of Civil and Environmental Engineering, Shiraz University of Technology, Shiraz, Iran

2 -Associate Professor, Faculty of Civil and Environmental Engineering, Shiraz University of Technology, Shiraz, Iran

ABSTRACT

In the developing countries, due to low cost, abundance of materials, substantial durability and ease of construction, masonry structures are still common construction system and blocks are conventional type of masonry units in these buildings. Despite the problems faced in utilizing simple blocks such as low out-of-plane strength and inconsistency in construction quality; achieving fast construction, economic solutions and enhancing performance and integrity subjected to in/out of plane loads encouraged civil engineers to make changes in the design and production process of masonry blocks for which interlocking blocks can be considered as an innovative solution. In this experimental study, a novel interlocking cement block were employed to construct small-scale masonry prisms. In two cases of using paste and mortarless interlocking blocks, six standard tests were used to evaluate in-plane behavior, including compressive strength, diagonal tensile strength, and in-plane direct shear strength tests, and out-of-plane behavior including flexural tensile strength in two directions and out-of-plane direct shear strength test of block prisms in the concrete technology laboratory of Shiraz University of Technology and the results were discussed. The proposed blocks can be used simply in practice. The results showed that the innovative blocks, due to the proper design of the appendages, showed appropriate and uniform behavior in terms of in/out of plane strength. In addition, adding paste can improve behavior and strength of the interlocking block.

ARTICLE INFO

Receive Date: 05 September 2020

Revise Date: 20 November 2020

Accept Date: 19 January 2021

Keywords:

*Masonry Wall
In-plane Strength
Interlocking Block
Mode of Failure
Out-of-plane Strength*

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2021.246795.2226>

*Corresponding author: Seyed Mahdi Dehghan
Email address: smdehghan@sutech.ac.ir

معرفی بلوک در هم قفل شونده نوین و بررسی آزمایشگاهی رفتار و مقاومت درون صفحه و برون صفحه نمونه‌های منشوری آن

وحید بانسی^۱، سید مهدی دهقان^{۲*}

۱- دانشجوی دکتری مهندسی زلزله، دانشکده مهندسی عمران و محیط‌زیست، دانشگاه صنعتی شیراز، شیراز، ایران

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی عمران و محیط‌زیست، دانشگاه صنعتی شیراز، شیراز، ایران

چکیده

در کشورهای درحال توسعه به دلیل هزینه پایین، فراوانی مصالح، دوام و ماندگاری فوق‌العاده و سهولت اجرا، سازه‌های بنایی هنوز سیستم ساخت‌وسازی رایج هستند و بلوک‌ها یکی از انواع واحدهای بنایی مرسوم در این نوع ساختمان‌ها به حساب می‌آیند. باوجود مشکلات موجود در کاربرد بلوک‌های ساده مانند ضعف در مقاومت برون صفحه و عدم یکنواختی کیفیت اجرا، به دلایلی مانند اجرای سریع، اقتصادی بودن و بهبود عملکرد و یکپارچی در بارهای درون و برون صفحه دیوارها، مهندسين عمران ملزم به ایجاد تغییر در طرح و تولید بلوک‌های بنایی شدند که استفاده از بلوک‌های در هم قفل شونده را می‌توان یکی از این نوآوری‌ها دانست. در این مطالعه آزمایشگاهی، با استفاده از یک نوع بلوک سیمانی در هم قفل شونده ابداعی جدید منشورهای بنایی در مقیاس کوچک ساخته شد. در دو حالت استفاده از چسب و به‌صورت خشکه‌چینی با بلوک در قفل شونده، شش آزمایش عملی مطابق استاندارد برای ارزیابی رفتار درون صفحه شامل آزمایش‌های مقاومت فشاری، مقاومت کشش قطری و مقاومت برش مستقیم درون صفحه و تعیین رفتار برون صفحه شامل آزمایش‌های مقاومت کشش خمشی در دو جهت و مقاومت برش مستقیم خارج از صفحه منشورهای بلوکی در آزمایشگاه تکنولوژی بتن دانشگاه صنعتی شیراز انجام و نتایج آن مورد بحث قرار گرفت. بلوک پیشنهادی در عمل به راحتی قابل کاربرد است. نتایج نشان داد که بلوک ابداعی به دلیل طراحی مناسب زائده‌ها رفتار مناسب و یکسانی از نظر مقاومتی در درون و برون صفحه دارند. همچنین، با اضافه کردن چسب می‌توان مقاومت و رفتار مناسب در حالت خشکه‌چینی را بهبود بخشید.

کلمات کلیدی: بلوک در هم قفل شونده، دیوار بنایی، مقاومت برون صفحه، مقاومت درون صفحه، نوع شکست.

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2021.246795.2226	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/jsce.2021.246795.2226	۱۴۰۰/۰۹/۳۰	۱۳۹۹/۱۰/۳۰	۱۳۹۹/۱۰/۳۰	۱۳۹۹/۰۸/۳۰	۱۳۹۹/۰۶/۱۵
سید مهدی دهقان smdehghan@sutech.ac.ir					*نویسنده مسئول: پست الکترونیکی:	

۱- مقدمه

زلزله یکی از مخرب‌ترین بلاهای طبیعی است که بشر همواره در طول تاریخ خود با آن مواجه بوده است. امروزه، بررسی رفتار سازه‌های مختلف تحت بار زلزله به‌منظور کاهش تلفات و خسارات مالی جبران‌ناپذیر، به هدفی مهم در طراحی تبدیل شده است. ساختمان‌های بنایی یکی از متداول‌ترین سیستم‌های سازه‌ای در جهان و واحدهای بنایی (شامل سنگ، آجر، بلوک و ...) از قدیمی‌ترین مصالح ساختمانی می‌باشد که در طول تاریخ همواره دارای اشکالات اجرایی و عملکردی غیرقابل‌انکاری بوده‌اند [۱]. روش‌های قدیمی و مرسوم ساخت آجر و بلوک با استفاده از مخلوط کردن مواد اولیه، قالب‌گیری آجرها و خشک کردن و عمل‌آوری آن‌ها تا رسیدن به سطح خاصی از مقاومت بوده است [۲]. با این حال، روند تولید آجر و بلوک در دو دهه گذشته به‌منظور کاهش کاستی روش‌های باستانی ساخت به روش‌های جدید گرایش پیدا کرده است که یکی از این روش‌های مدرن استفاده از بلوک‌های در هم قفل شونده (Interlocking Blocks) هستند. بلوک‌های در هم قفل شونده می‌توانند با و بدون استفاده از ماده چسبنده که به‌صورت خشکه‌چینی بدون ملات است مورد استفاده قرار بگیرند و همچنین بر اساس شکل هندسی خود می‌توانند عملکرد مختلفی را در برابر بارهای درون و برون صفحه از خود نشان دهند.

اخیراً، تلاش‌های زیادی در نقاط مختلف جهان برای ایجاد بلوک‌های در هم قفل شونده انجام شده است. به‌عنوان قدیمی‌ترین و جز مطالعات اولیه موجود در این زمینه می‌توان به پژوهش تالون در سال ۱۹۸۳ در آمریکا اشاره کرد [۳] که در این پژوهش به معرفی این سیستم‌ها و بلوک‌ها می‌پردازد و بیشتر توجه خود را به بلوک‌های خشکه‌چینی معطوف می‌کند. در مورد ابداع و توسعه بلوک‌های در هم قفل شونده می‌توان به پژوهش‌های زیر اشاره کرد:

در سال ۲۰۱۲ علی و همکاران در نیوزلند یک نوع بلوک در هم قفل شونده معرفی و ابداع کردند. در این مطالعه برای ساخت بلوک‌ها از الیاف نارگیل استفاده شد و رابطه بین مقاومت فشاری بلوک‌های استاندارد تک و منشورهای چند بلوکی و ظرفیت‌های برشی درون صفحه و خارج از صفحه سازوکار اتصال آن‌ها را بررسی کردند. برای این منظور چهار شکل از بلوک شامل بلوک استاندارد کامل، بلوک نیمه، بلوک پایینی و بلوک بالایی ساخته شد [۴].

کومار در سال ۲۰۱۴ با طراحی بلوک در هم قفل شونده خود نشان داد که بلوک ابداعی توسط زائده‌های افقی و عمودی جهت جلوگیری از حرکت‌های انتقالی و زائده‌ای T شکل جهت جلوگیری از حرکت‌های عمودی روی بلوک طراحی شده‌اند [۵].

در سال ۲۰۱۴ فی و همکاران یک بلوک خاکی سیمانی در هم قفل شونده برای ساخت و ساز دیوار بنایی ایجاد کردند که با قالب پرس، بلوک‌های ابداعی ایجاد شدند و نمونه‌ها در سه مخلوط خاک و سیمان در سه اندازه متفاوت تکمیل و ساخته شدند که مطابق با استانداردهای مرتبط مقاومت در برابر فشار و جذب آب آن‌ها مورد اندازه‌گیری قرار گرفت [۶].

در سال ۲۰۱۶ آید و همکاران در تونس به‌صورت آزمایشگاهی و عددی روی یک نوع بلوک در هم قفل شونده و دیوار ساخته شده با آن مطالعه کردند و هدف آن‌ها مطالعه روی مشخصات فشاری و رفتار آن‌ها در فشار مانند انتشار ترک بود که نتایج آزمایش نشان داد که ناحیه تماس و فاصله بین بلوک‌ها، روی مقاومت فشاری واحدهای بنایی تأثیر دارد و باعث کاهش آن می‌شود [۷].

در سال ۲۰۱۹ هانگ وانگ و همکاران یک نوع بلوک در هم قفل شونده را در چین مورد بررسی قرار دادند که در بلوک پیشنهادی تزریق گروت در حفره‌های عمودی موجود در بلوک باعث قفل شوندگی می‌شد که این امر منجر به از بین رفتن فاصله بین بلوک‌ها در حین ساخت و پایداری بیشتر دیوار شد [۸].

همچنین، بلوک‌های در هم قفل شونده متنوعی بانام‌های گوناگونی در سال‌های مختلف توسط پژوهشگران ابداع و توسعه یافتند که هرکدام از آن‌ها متناسب با مواد و تکنولوژی کشورهای مختلف ساخته شده و رفتارهای مختلفی را در هنگام بارگذاری از خود نشان می‌دهند که به‌عنوان مثال می‌توان به بلوک‌های Auram [۹]، Hydraform [۱۰]، HiLoTec [۱۱]، Thai Rhino [۱۲] اشاره کرد.

در خصوص آزمایش‌های درون صفحه و برون صفحه منشورها و سیستم‌های ساخته شده با بلوک‌های در هم قفل شونده می‌توان به پژوهش‌های زیر اشاره کرد:

در مالزی، تانون و همکاران در سال ۲۰۰۴ سیستم بلوک توخالی باتحمل بار به هم پیوسته به نام بلوک پوترا را توسعه دادند. بلوک‌های مختلفی با توجه به وزن، تحمل برش، شکل، سهولت تولید، توانایی قرارگیری اتصالات تثبیت کننده تقویت کننده عمودی و افقی و کارایی مکانیسم اتصال در بارهای اعمالی بررسی شد و نتیجه گرفتند که سیستم توسعه یافته و معرفی شده یک سیستم ساختمانی سریع، آسان و دقیق را ارائه می‌دهد [۱۳].

عثمان و همکاران در سال ۲۰۱۴ رفتار سازه‌ای دیوارهای ساخته شده با بلوک قفل شونده معروف به سیستم Brickcool را در حالت‌های با و بدون میلگرد تقویتی تا زمان شکست نمونه‌ها مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها اثرات کرنش و تغییر شکل نمونه‌ها را در حالت‌های تقویت شده و تقویت نشده آزمایش کردند و نتیجه گرفتند که مدل‌های تقویت شده در مقایسه با مدل‌های تقویت نشده ظرفیت باربری بیشتر و تغییر شکل کمتری در بالای دیوار داشتند [۱۴].

یوسف و همکاران در سال ۲۰۱۷ در مورد رفتار خارج از صفحه دیوارهای ساخته شده با یک نوع بلوک در هم قفل شونده را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها در پژوهش خود از روش پیش تنیدگی در دیوارها استفاده کردند. نتایج نشان داد که دیوارهای پیش کشیده از انعطاف پذیری مناسبی برخوردار هستند و مقدار بار نهایی تحمل شده با افزایش درصد پیش کشیدگی، افزایش می‌یابد [۱۵].

جسلین و همکاران در سال ۲۰۲۰ با استفاده از یک بلوک قفل شونده سیمانی آزمایش‌های مقاومت برشی و فشاری منشورهای ساخته شده را آزمایش و نتایج را با بلوک ساده مقایسه کرد. نتایج نشان داد که مقاومت فشاری منشورهای ساخته شده با بلوک پیشنهادی ۱۵ تا ۳۰ درصد مقاومت بیشتری را نسبت به منشورهای ساخته شده با بلوک ساده داشته و همچنین مقاومت چسبندگی برشی بلوک‌های قفل شونده از بلوک‌های ساده بیشتر بوده و در کل نتیجه گرفتند که بلوک‌های در هم قفل شونده رفتارهای بهتری نسبت به بلوک‌های ساده دارند [۱۶].

افضل و همکاران در سال ۲۰۲۰ یک نوع بلوک قفل شونده ابداعی را با استفاده از پودر مرمر ضایعاتی ساخته و در دو فاز شامل بررسی مشخصات بلوک و مشخصات مکانیکی دیوارهای ساخته شده با بلوک پیشنهادی، پژوهش خود را بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که با افزایش پودر مرمر ضایعاتی مقاومت فشاری بلوک کاهش می‌یابد و مقاومت خارج از صفحه دیوارهای ساخته شده با افزایش این نوع پودر افزایش می‌یابد [۱۷].

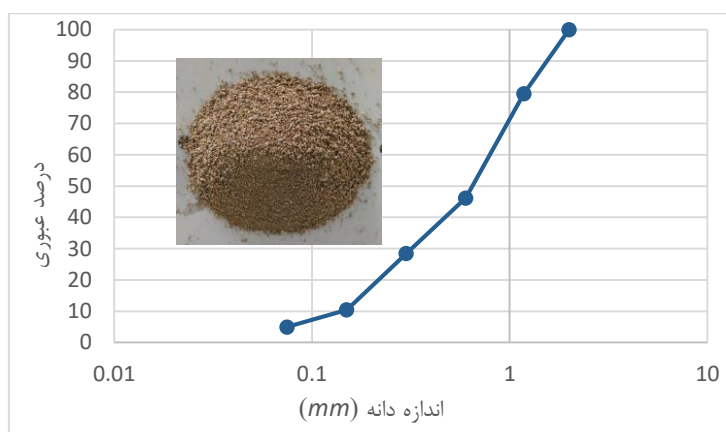
سیستم‌های سازه‌ای در هم قفل شونده در سراسر جهان در طول تاریخ مورد مطالعه قرار گرفتند و محققین نام‌های مختلفی را روی آن‌ها گذاشتند [۱۸-۲۱]. علاوه بر این مطالعات، به تازگی در مورد این نوع بلوک‌ها و رفتار آن‌ها و سیستم سازه‌ای آن‌ها در سراسر دنیا پژوهش‌های صورت گرفته است [۲۲-۲۳].

با توجه به تنوع تحقیقات انجام شده در زمینه بلوک‌های در هم قفل شونده و سیستم سازه‌ای ساخته شده در سراسر دنیا می‌توان به این نکته پی برد که روش اجرای این نوع سازه‌ها بر اساس ویژگی‌های مصالح و شیوه اجرایی، مختص و متناظر هر کشور است. مطالعات در این زمینه در ایران بسیار اندک و غیرقابل دسترس هستند و همچنین به دلیل اینکه سازه‌های بنایی هنوز رایج‌ترین سیستم ساخت و ساز در ایران هستند و از طرفی با توجه به ضعف شدید لرزه‌ای این نوع سازه‌ها نیاز به صنعتی نمودن و بهبود سازوکار اجرای دیوارهای بنایی وجود دارند. از این رو مطالعه حاضر با انجام آزمایش‌های مختلف درون صفحه و برون صفحه روی یک نوع بلوک قفل شونده ابداعی که امکان استفاده از هر دو نوع تکنیک ساخت سیستم سازه‌ای یعنی بدون ماده چسبنده (خشکه چینی) و با ماده چسبنده را دارد، می‌تواند تا حدی زیادی نیازهای یک سیستم بهینه و مقاوم را برطرف کند و نقش بسیار مؤثری را در این زمینه ایفا کند. همچنین، انتظار می‌رود مطالعه حاضر به ابداع و معرفی یک بلوک در هم قفل شونده جدید سازگار با مصالح بومی و شیوه اجرایی کشور ایران منجر شود. نوآوری این پژوهش نسبت به مطالعات پیشین، به‌طور کلی استفاده از یک هندسه جدید و متفاوت در تولید بلوک در هم قفل شونده است که قابلیت استفاده در دو حالت مرسوم ساخت و ساز خشکه چینی و استفاده از ماده چسبنده را دارد. از سوی دیگر، شیوه جدید ساخت بلوک‌ها با استفاده از قالب‌های دقیق ساخته شده با چاپگر سه بعدی امکان ساخت بلوک در مقیاس کوچک را در فراهم می‌آورد و اجازه می‌دهد با هزینه کمتر و اجرای آسان‌تر، قابلیت ساخت و جنبه‌های مختلف عملکرد این بلوک جدید را به صورت آزمایشگاهی مورد ارزیابی قرار داد.

۲- مشخصات مصالح مصرفی

۲-۱- مشخصات مصالح بلوک‌ها

برای ساخت بلوک‌های پیشنهادی در این پژوهش، مصالح مصرفی شامل ماسه و سیمان با نسبت ترکیبی ۱ حجم سیمان و ۳ حجم ماسه بود. بدین منظور، از سیمان پرتلند تیپ دو کارخانه سیمان فارس-خوزستان و از ماسه ریز معدن دوکوهک شیراز با نمودار دانه‌بندی مطابق شکل ۱، استفاده شد.



شکل ۱: نمودار دانه‌بندی ماسه مورد استفاده در ساخت بلوک‌ها

مشخصات مقاومتی مصالح بلوک‌ها شامل مقاومت فشاری طبق استاندارد ASTM C109 [۲۴]، مقاومت خمشی طبق استاندارد ASTM C348 [۲۵] و همچنین مشخصات کارایی شامل روانی طبق استاندارد ASTM C1437 [۲۶] و نسبت آب به سیمان اندازه‌گیری و در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱: مشخصات مقاومتی و کارایی مصالح بلوک‌ها

نسبت آب به سیمان (W/C)	(%) روانی	(MPa) مقاومت خمشی	(MPa) مقاومت فشاری
0.88	110	3.2	23.3

۲-۲- مشخصات چسب

چسب مصرفی از ترکیب پودری پایه سیمانی سیلیس دار با آب با نسبت مشخص به دست آمد که پس از ترکیب، حالت خمیری به خود گرفت. خمیر حاصل بین لایه‌های اتصال بلوک‌ها مورد استفاده قرار گرفت تا بلوک‌ها در حالتی که از چسب استفاده شد را به هم متصل نماید. مشخصات چسب استفاده شده برای حالت‌هایی که منشورهای بلوکی با چسب به هم متصل می‌شوند مطابق جدول ۲ است. این مشخصات، شامل نسبت آب به پودر چسب، روانی چسب، مقاومت فشاری و مقاومت خمشی مطابق استانداردهای عنوان شده برای مصالح بلوک‌ها می‌باشد. شکل ۲ نحوه استفاده یکسان از چسب در بین لایه‌های بلوک در منشورهای ساخته شده را نشان می‌دهد. چسب با لغزاندن بلوک‌ها روی هم تقریباً به صورت یکنواخت در عرض بلوک پخش می‌شود و سپس مقدار مازاد از سطح نمونه برداشته می‌شود. لازم به ذکر است طبق توصیه سازنده چسب مورد نظر پس از گیرش مقاوم در برابر آب است، در محدوده دمای ۱۰ تا ۴۰ درجه سانتیگراد قابل استفاده است، نیازی به مرطوب کردن بلوک‌ها در زمان کار ندارد و پس از حدود ۸ تا ۱۰ دقیقه به گیرش اولیه می‌رسد؛ لذا به راحتی در شرایط محیطی معمول در آزمایشگاه چسب ساخته و مورد استفاده قرار گرفت.

جدول ۲: مشخصات مقاومتی و کارایی چسب

نسبت آب به پودر چسب (P/C)	(%) روانی	(MPa) مقاومت خمشی	(MPa) مقاومت فشاری
0.3	42	6.5	6.73

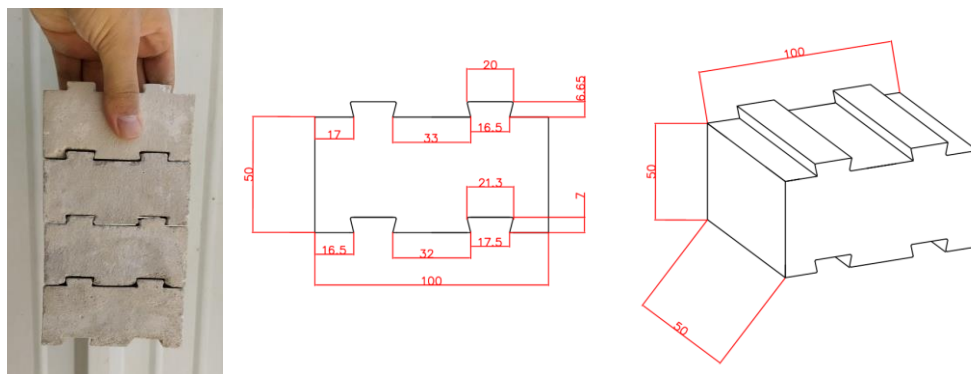


شکل ۲: نحوه استفاده از چسب در منشورهای ساخته شده با چسب

۳- مشخصات بلوک قفل شونده

۳-۱- مشخصات هندسی بلوکها

هندسه و ابعاد بلوکهای در هم قفل شونده ابداعی پژوهش حاضر مطابق شکل ۳ است. این بلوکها در مقیاس کوچک (نسبت ۱ به ۳) نسبت به بلوکهای واقعی با ابعاد $150 \times 150 \times 300$ میلی متر جهت انجام آزمونهای متنوع درون و برون صفحه ساخته شدند. در طراحی این بلوکها از دو زائده بیرون زده در بالا و دو زائده تورفته در پایین به صورت متقارن استفاده شدند که شکل این زائدهها به دلیل اینکه در هنگام قرارگیری متوالی روی هم در هم قفل شده و بتوان از آنها در حالت خشکه چینی استفاده کرد به صورت دوزنقه ای انتخاب شدند (شکل ۲). هندسه انواع بلوکهای مصرف برای ساخت دیوار مصالح بنایی در شکل ۳ مشاهده می گردد.



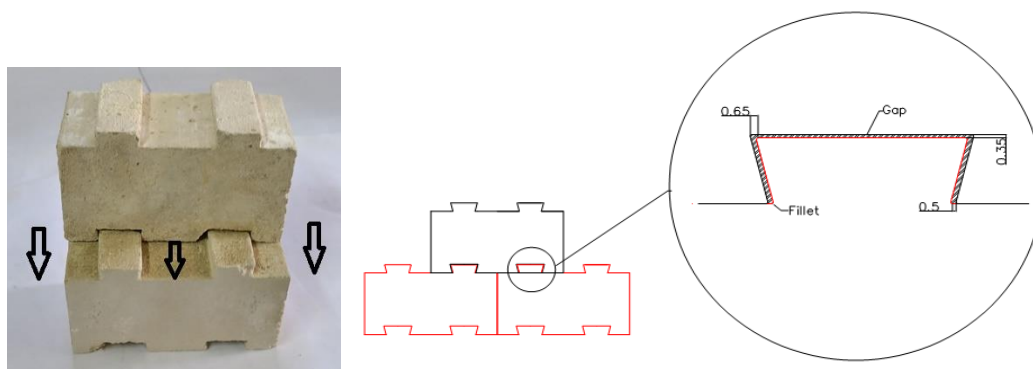
شکل ۳: هندسه بلوکهای در هم قفل شونده و قفل شدن بلوکها در هنگام قرارگیری روی هم (ابعاد بر حسب میلی متر)

شکل ۴ نیز انواع بلوکهای مورد استفاده در ساخت منشورهای بلوکی، شامل بلوک کامل، نیم بلوک، بلوک بالایی و بلوک پایینی جهت ساخت نمونههای فشاری را نشان می دهد.



شکل ۴: انواع بلوک‌های در هم قفل شونده جهت ساخت دیوار بنایی (از راست به چپ: نیم بلوک، بلوک کامل، بلوک بالایی و بلوک پایینی)

به دلایلی شامل اجرای آسان‌تر و وجود فضایی برای قرارگیری چسب بین لایه‌های اتصال بلوک‌ها در منشورهای بلوکی، نحوه طراحی هندسه بلوک‌های پیشنهادی به گونه‌ای است که درزی (Gap) بین زائده‌های بالایی و پایینی وجود دارد به نحوی که تورفتگی‌ها بزرگ‌تر از بیرون زدگی‌ها هستند که در شکل ۵ مشاهده می‌گردد. وجود درزها در عملکرد درون و بیرون صفحه منشورهای بلوکی نقش غیرقابل انکاری دارند، ولی معیار انتخاب مقدار درز در این پژوهش صرفاً به دلیل مسائل اجرایی و امکان قرارگیری چسب بین بلوک‌ها است. حجم و مساحت تقریبی این درز به ترتیب برابر است با $72/5$ میلی‌متر مکعب و $14/5$ میلی‌متر مربع است. هندسه بلوک‌های پیشنهادی طوری است که این بلوک‌ها به صورت افقی و به حالت کشویی مانند شکل ۵ در هم قفل و اجرا می‌شوند و گوشه‌های زائده‌های بالا و پایین به صورت گرد گوشه (Fillet) هستند تا از خرد شدن گوشه‌ها هنگام جاگذاری بلوک‌ها روی هم جلوگیری کند.



شکل ۵: نحوه اجرای کشویی بلوک‌ها و درز موجود در بین زائده‌های بلوک‌ها (ابعاد بر حسب میلی‌متر)

۲-۳- روش ساخت بلوک‌ها

بلوک‌های سیمانی قفل شونده مورد مطالعه در پژوهش حاضر به وسیله قالب‌های ساخته شده توسط پرینتر سه بعدی تولید شدند. به دلیل کوچک مقیاس بودن بلوک‌ها و دقت بالا در ساخت آن‌ها از فناوری چاپگرهای سه بعدی برای ساخت قالب‌ها استفاده شد. قالب‌ها به دلیل خارج کردن راحت نمونه‌ها از قالب و آسیب ندیدن بلوک‌ها هنگام بیرون آوردن آن‌ها به صورت دو تیکه‌ای و کشویی ساخته شدند (شکل ۶). نمونه‌های بلوک پس از مخلوط شدن ماسه و سیمان با نسبت معین آب در قالب‌ها ریخته شده و پس از یک روز از قالب‌ها خارج و به مدت ۲۸ روز در آب عمل‌آوری شدند.

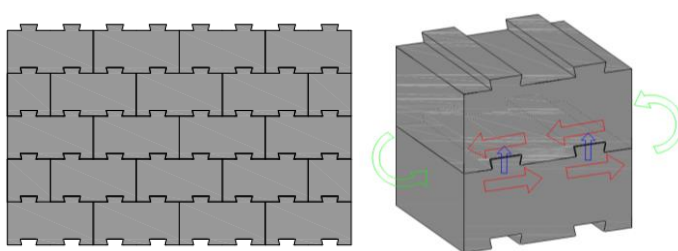


شکل ۶: قالب‌های ساخته شده توسط چاپگر سه بعدی و ساخت بلوک در قالب

۳-۳- سازوکار قفل‌شدگی زائده‌های بلوک‌ها

سازوکار قفل‌شدگی بلوک پیشنهادی متکی بر درگیری فیزیکی زائده‌های تعبیه‌شده روی بلوک‌ها با شیار موجود زیر بلوک‌ها است، به طوری که پس از قرارگیری بلوک‌ها روی یکدیگر زائده‌ها در هم قفل‌شده و عملکرد رفتاری مناسبی را تحت کنش‌های درون صفحه و بیرون از صفحه از خود مطابق شکل ۷ نشان می‌دهد. زوج بودن زائده‌ها امکان اجرای پیوند مناسب مابین ردیف‌های بلوک‌های قفل‌شونده را فراهم می‌آورد.

همان‌طور که در شکل ۷ دیده می‌شود، بلوک‌ها در جهت پیکان قرمز به دلیل قفل‌شدگی زائده‌ها رفتار درون صفحه انتقالی مناسبی از خود نشان می‌دهند و از سوی دیگر در امتداد پیکان آبی به دلیل هندسه دوزنقه وارون زائده‌ها و قفل شدن آن‌ها در شیار بلوک فوقانی، بلوک‌ها قفل‌شدگی مناسبی را در مقابل بلند شدگی از روی هم دارند. همچنین، امتداد یافتن زائده‌ها در عرض بلوک نقش مناسبی را در جلوگیری از چرخش بلوک‌ها روی هم در خارج از صفحه از خود نشان می‌دهند (چرخیدن مانند پیکان سبز رنگ).



شکل ۷: سازوکار درگیری زائده‌های بلوک‌ها

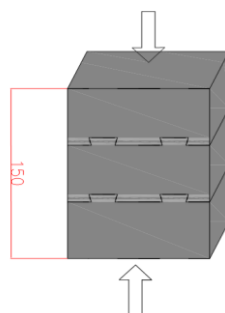
علاوه بر سازوکار درگیری مکانیکی فوق، عامل بازدارنده از حرکت انتقال خارج از صفحه این بلوک‌ها نسبت به هم توسط سطح تماس بیشتر این بلوک در هنگام قرارگیری روی هم و وجود اصطکاک بین بلوکی تأمین می‌شود که در قسمت آزمایش‌ها این ضریب اصطکاک تعیین شده است.

۴- برنامه آزمایشگاهی

در این پژوهش، رفتار درون صفحه شامل آزمایش‌های مقاومت فشاری، مقاومت کشش قطری و مقاومت برش درون صفحه و رفتار خارج از صفحه شامل آزمایش‌های مقاومت برش خارج صفحه و دو نوع مقاومت کشش خمشی خارج صفحه منشورهای بلوکی با استفاده از بلوک قفل‌شونده نوین در دو حالت بدون چسب (خشکه‌چینی) و با چسب به صورت کمی (تعیین مقاومت) و کیفی (نحوه ترک‌خوردگی و شکست) مورد بررسی آزمایشگاهی قرار گرفت. در این بخش، به روش آماده‌سازی نمونه‌ها و نحوه انجام آزمایش‌های استاندارد پرداخته می‌شود. در حالت اجرا با چسب منشورها پس از ساخت به مدت ۲۸ روز در آب عمل‌آوری شدند.

۴-۱- مقاومت فشاری منشور

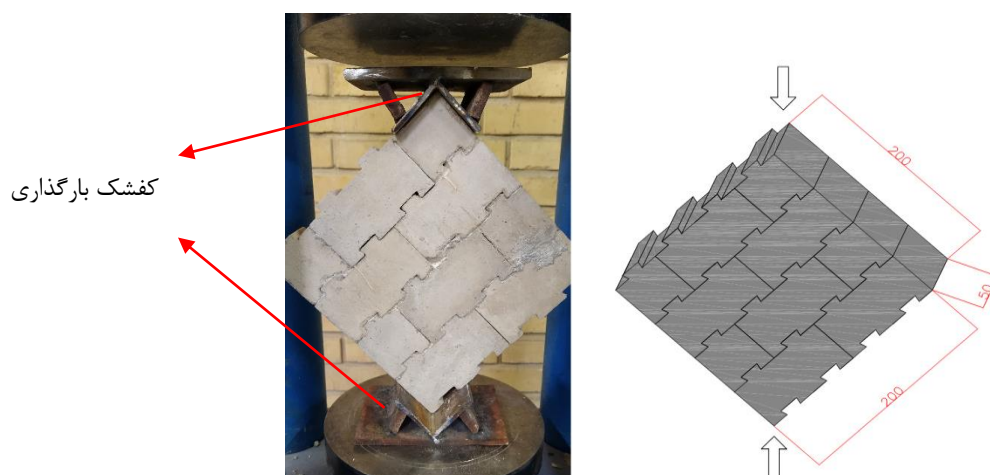
ساخت و آزمایش نمونه‌های فشاری مطابق با استاندارد ASTM C1314 [۲۷] هست. نمونه‌ها از چیدن سه بلوک روی یکدیگر با ابعاد تقریبی $150 \times 100 \times 50$ میلی‌متر ساخته شدند. نتایج گزارش داده‌شده از میانگین سه منشور بلوکی مشابه در هر دو حالت خشکه‌چینی و با چسب (پس از نگهداری در آب به مدت ۲۸ روز) به دست آمدند. در نمونه‌های فشاری به دلیل زائده‌های موجود در بلوک‌ها، بلوک‌های بالایی و پایینی با سطح صاف مطابق شکل ۴ ساخته و در منشورهای بلوکی استفاده و مورد آزمایش قرار گرفتند. شکل ۸ جزئیات نحوه آزمایش مقاومت فشاری را نشان می‌دهد.



شکل ۸: نحوه انجام آزمایش مقاومت فشاری

۲-۴- مقاومت کشش قطری

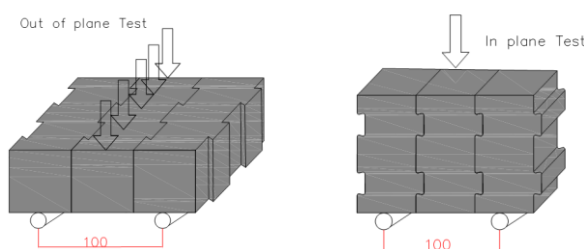
روش و تعیین مقاومت کشش قطری بر مبنای استاندارد ASTM E519 [۲۸] انجام شد. مشخصات هندسی پانل‌های بلوکی مطابق شکل ۹ ساخته شدند که ضخامت پانل یک بلوک و طول دو بلوک و ارتفاع چهار بلوک به ابعاد تقریبی ۲۰۰×۲۰۰×۵۰ میلی‌متر بود. از هر نمونه منشور با چسب و بدون چسب تعداد سه منشور ساخته و آزمایش شدند و میانگین نتایج آن‌ها گزارش شد. نمونه‌ها به صورت قطری توسط دو کفشک بارگذاری در بالا و پایین نمونه مانند شکل ۹ بارگذاری شدند.



شکل ۹: ابعاد و نحوه آزمایش مقاومت کشش قطری پانل‌ها

۳-۴- مقاومت برش مستقیم داخل و خارج از صفحه

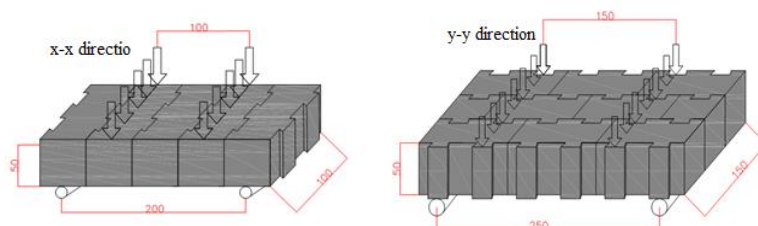
برای تعیین مقاومت چسبندگی برشی منشورهای بلوکی در داخل و خارج از صفحه از آزمون سه بلوکی مانند پژوهش‌های قبلی [۲۹] استفاده شد. نحوه انجام آزمایش و فاصله بین تکیه‌گاه‌ها و محل اعمال بار در حالت داخل و خارج از صفحه در شکل ۱۰ ارائه شده است. برای هر کدام از حالت‌های با و بدون چسب از سه منشور بلوکی ساخته شده میانگین گرفته و مقاومت چسبندگی برشی گزارش شد.



شکل ۱۰: ابعاد و نحوه آزمایش مقاومت برش مستقیم داخل و خارج از صفحه منشورها

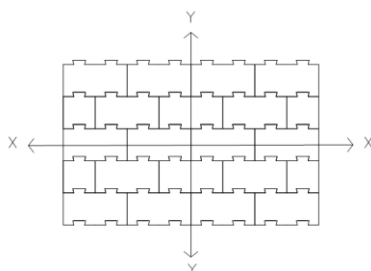
۴-۴- مقاومت کشش خمشی خارج از صفحه

در این پژوهش، مقاومت چسبندگی خمشی شامل دو آزمون در دو جهت خمش خارج از صفحه $x-x$ (خمش حول محور قائم) و $y-y$ (خمش حول محور افقی به موازات دیوار) است که به صورت آزمون خمشی سه نقطه بارگذاری محاسبه و اندازه گیری شد. نحوه آزمون و ساخت نمونه‌ها برای خمش در جهت $x-x$ بر اساس استاندارد مربوطه ASTM E518 [۳۰] بود و برای ساخت و آزمون چسبندگی خمشی در جهت $y-y$ از رویکرد پژوهش‌های قبلی [۳۱] استفاده شد. طبق شکل ۱۱، نمونه‌های خمشی $x-x$ متشکل از پنج بلوک روی هم و نمونه‌های خمشی $y-y$ به طول سه بلوک و عرض سه بلوک و ضخامت یک بلوک می‌باشد.



شکل ۱۱: اندازه و نحوه آزمایش مقاومت کشش خمشی خارج از صفحه منشورها

منظور از خمش حول محورهای $x-x$ و $y-y$ در شکل ۱۲ روی دیوار واقعی مشخص شده است که در هر دو آزمایش خمشی باربری در جهت خارج از صفحه هست. از هر حالت با و بدون چسب تعداد سه منشور بلوکی ساخته و میانگین مقاومت خمشی آن‌ها در هر جهت به عنوان مقاومت خمشی نهایی گزارش شد.



شکل ۱۲: جهت‌های معرفی شده برای آزمایش مقاومت کشش خمشی خارج از صفحه

۵- نتایج و بحث

نتایج حاصل از اندازه‌گیری میانگین مقاومت فشاری، مقاومت کشش قطری؛ مقاومت برش مستقیم در دو جهت داخل و خارج از صفحه و مقاومت کشش خمشی در دو جهت به تفکیک نوع آزمایش شامل منشورهای بلوکی حالت خشکه‌چینی و حالت با چسب در ادامه ارائه و بررسی می‌شود.

۵-۱- مقاومت فشاری منشور

نتایج حاصل از میانگین مقاومت فشاری منشورهای بلوکی ساخته‌شده با بلوک قفل شونده پیشنهادی در دو حالت استفاده از ماده چسبنده و بدون استفاده از ماده چسبنده (خشکه‌چینی) در جدول ۳ ارائه شده است. برای مقایسه بهتر، مقاومت فشاری مصالح بلوک و چسب نیز در این جدول آورده شده است.

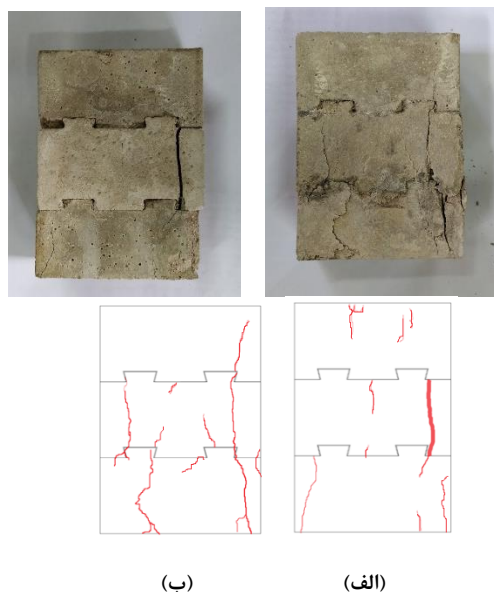
جدول ۳: نتایج آزمایش مقاومت فشاری

نوع منشورها	مقاومت فشاری منشور بلوکی f_{cm} (MPa)	مقاومت فشاری چسب (MPa)	مقاومت فشاری بلوک (MPa)
با چسب	13.4	6.73	23.3
خشکه‌چینی	9.8		

با توجه به نتایج جدول می‌توان به این نتیجه رسید که مقاومت فشاری منشورهای بلوکی در حالت با چسب از حالت بدون چسب بیشتر است و درصد افزایش مقاومت فشاری با تغییر منشور بلوکی بدون چسب به منشور بلوکی با چسب مقدار ۳۷ درصد می‌باشد.

در حالتی که از چسب استفاده می‌شود، پر شدن فضای خالی بین بلوک‌ها با پیوستگی بیشتر بلوک‌ها و افزایش سطح مؤثر تماس فشاری بلوک‌ها منجر به افزایش مقاومت فشاری منشورهای فشاری می‌شود. همچنین با مقایسه مقاومت فشاری منشورهای بلوکی با بلوک‌های ساده و آجرهای ساده با ملات پژوهش‌های گذشته [۳۲-۳۳] و مقایسه با مقاومت فشاری منشورهای بلوکی با بلوک در هم قفل شونده پژوهش حاضر می‌توان به این نتیجه رسید که هم در حالت خشکه‌چینی و هم در حالت با چسب این منشورها به دلیل قفل شونده و سطح تماس بیشتر باهم مقاومت فشاری بیشتری دارند.

با بررسی نوع شکست فشاری منشورهای بلوکی در حالت با و بدون چسب (شکل ۱۳)، نوع شکست منشورهایی که با چسب به هم متصل شده بودن طبق استاندارد ASTM C1314 [۲۷] بیشتر از نوع مخروطی و شبه مخروطی و شکستگی در سطح بلوک‌ها رخ داد که ترک‌ها در طول و امتداد نمونه‌ها و لایه‌های چسب انتشار پیدا کرد. این امر می‌تواند به دلیل یکپارچگی و پیوستگی بلوک‌ها به دلیل پر شدن فاصله بین بلوکی با لایه‌های چسب باشند که بیشتر بودن مقاومت فشاری این منشورها نیز در مطالعات قبلی نیز همین نوع شکست برای منشورهای فشاری گزارش شده است [۷ و ۳۳]. شکست در منشورهای فشاری بدون چسب از نوع برشی در قسمت پاشنه‌های کناری بلوک‌ها و ترک‌های ریزی از نوع فشاری در مرکز بلوک‌ها بود. به علت فاصله بین زائده‌های بالا و پایین بلوک‌ها که منجر به ایجاد فضا و عدم پیوستگی به دلیل نبود چسب در این درز بین بلوک‌ها و همچنین تمرکز تنش بیشتر در این ناحیه به علت نیروی فشاری، نوع شکست منشورهای فشاری در حالت بدون چسب به این‌چنین شکستی منجر می‌شود که در مطالعات گذشته نیز به این امر اشاره شد [۷].



شکل ۱۳: شکست نمونه‌های فشاری (الف-خشکه چینی ب-با چسب)

۲-۵- مقاومت کشش قطری منشور

میانگین نتایج حاصل از مقاومت کشش قطری منشورهای بلوکی ساخته شده در دو حالت استفاده از چسب و بدون استفاده از چسب در جدول ۴ آورده شده است.

جدول ۴: نتایج آزمایش مقاومت کشش قطری

نوع منشورها	مقاومت کشش قطری (MPa)
با چسب	0.81
خشکه چینی	0.45

همان‌طور که در جدول ۴ آمده است مقاومت کشش قطری نمونه‌های با چسب بیشتر از مقاومت کشش قطری نمونه‌های بدون چسب است که این مقدار نسبی افزایش به میزان ۸۰ درصد است و عامل این مقدار افزایش در مقاومت کشش قطری به دلیل چسبندگی بیشتر به دلیل استفاده از چسب در بین لایه‌های بلوکی می‌باشد. در حالت بدون چسب نیز مقاومت کشش قطری ۰٫۴۵ مگاپاسکال ثبت شده است که در مقایسه با منشورهای ساخته شده با بلوک‌های ساده که در حالت خشکه چینی هیچ‌گونه مقاومتی ندارند، مقداری قابل توجه است که به صورت مستقیم ناشی از عملکرد قفل شوندگی زائده‌های روی بلوک‌های ابداعی در حالت خشکه چینی هستند.

نوع شکست نمونه‌های قطری در حالت استفاده از چسب در شکل ۱۴ مشاهده می‌شود. نوع شکست نمونه‌های قطری با استفاده از چسب به صورتی بود که ابتدا ترک‌های قطری در امتداد قطر نمونه‌ها ایجاد شدند سپس در اثر افزایش بار، طول ترک‌ها افزایش و در تمام قطر نمونه ادامه پیدا کرده و در نهایت به صورت کاملاً قطری و تدریجی نمونه‌ها شکسته شدند.



شکل ۱۴: شکست نمونه‌های قطری با چسب

نوع شکست نمونه‌های قطری بدون استفاده از چسب (خشکه‌چینی) در شکل ۱۵ ارائه شده است. نمونه‌ها ابتدا به دلیل فاصله بین زائده‌ها بلوک‌ها نسبت به هم اندکی جابجایی اولیه داشته و سپس در ادامه درگیر شدن زائده‌ها در هم باعث افزایش باربری شدند و در نهایت با افزایش بار نمونه‌ها به صورت قطری و به صورت ناگهانی و بدون ایجاد ترک در نمونه قطری شکسته و به پایین ریخته شدند. علت خرد شدن نمونه قطری می‌تواند شکست ناگهانی زائده‌های کناری بلوک‌ها به علت شکست برشی آن‌ها باشند که این موضوع به خوبی در شکل ۱۵ مشهود است و همان‌طور که مشخص است زائده‌های طراحی شده به خوبی در هم قفل شده و در حین باربری ایفای نقش کردند.



شکل ۱۵: شکست نمونه‌های قطری بدون چسب

۳-۵- مقاومت برش مستقیم درون صفحه منشور

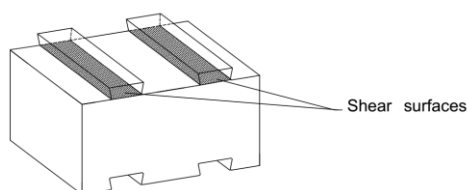
نتایج حاصل از مقدار مقاومت برشی درون صفحه آزمایش برش مستقیم سه بلوک در حالت استفاده از چسب و عدم استفاده از چسب در جدول ۵ خلاصه شده است.

جدول ۵: نتایج آزمایش مقاومت برشی درون صفحه

نوع منشورها	مقاومت برشی داخل صفحه (MPa)
با چسب	0.55
خشکه‌چینی	0.34

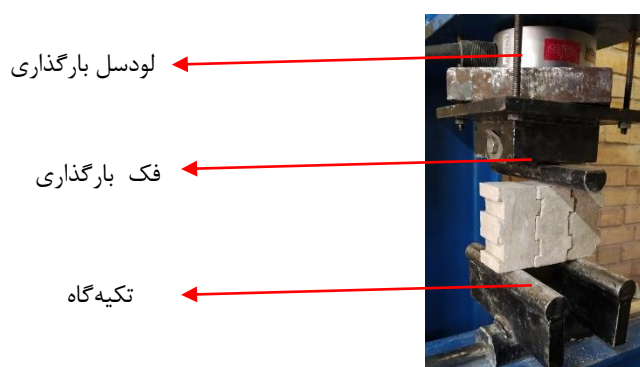
بر اساس جدول ۵، مقاومت برش مستقیم درون صفحه منشورهای ساخته شده با چسب ۶۱ درصد بیشتر از منشورهای ساخته شده بدون چسب هست. دلیل این افزایش مقاومت طبیعتاً به دلیل چسبندگی ایجاد شده توسط چسب است که می‌توان نتیجه گرفت استفاده از چسب در این نوع بلوک در هم قفل شونده اثر فزاینده‌ای در بهبود مقاومت برش مستقیم درون صفحه دارد. این در حالی است که منشورهای بلوکی بدون چسب پیشنهادی نیز نسبت به سایر بلوک‌های ساده که هیچ نوع مقاومت برشی درون صفحه‌ای در حالت

خشکه چینی ندارند، توانایی باربری درون صفحه دارند که مزیتی مثبت است. این سطوح مقاومت برشی در شکل ۱۶ مشخص شده است. در نتیجه زائده‌های طراحی شده نقش اصلی در تأمین مقاومت برشی درون صفحه ایفا می‌کنند.

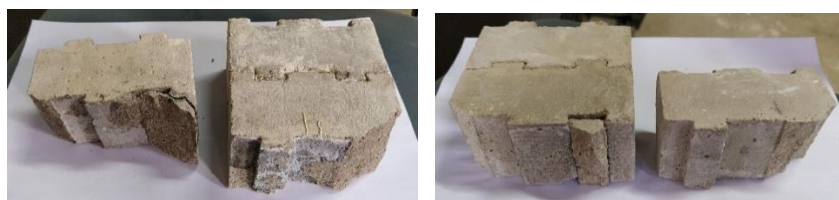


شکل ۱۶: سطوح برشی بلوک‌ها در مقاومت برش مستقیم درون صفحه

جزئیات نحوه آزمایش در شکل ۱۷ و انواع خرابی نمونه‌های برشی داخل صفحه در شکل ۱۸ مشاهده می‌شود. با مقایسه نوع شکست، نیز می‌توان دریافت که نوع شکست در هر دو حالت شبیه به هم بوده و همراه با شکست زائده‌های کناری است.



شکل ۱۷: نحوه انجام آزمایش مقاومت برش مستقیم درون صفحه



(ب)

(الف)

شکل ۱۸: شکست نمونه‌های آزمایش مقاومت برش مستقیم درون صفحه (الف-خشکه چینی ب-با چسب)

۴-۵- مقاومت برش مستقیم برون صفحه منشور

میانگین نتایج حاصل از آزمون برش مستقیم سه بلوک برون صفحه در جدول ۶ آورده شده است. نتایج حاصل نشان می‌دهد که مقاومت برشی خارج از صفحه منشورها در حالت بدون چسب همان‌طور که در شکل ۱۹ به خوبی مشهود است، ناچیز (صفر) است که این به دلیل قفل نشدن زائده‌ها در حالت حرکت انتقالی خارج از صفحه به موازات امتداد زائده‌ها می‌باشد. از طرفی با توجه به فاصله موجود بین زائده‌ها و نبود نیروی عمود بر سطح تماس بلوک‌ها اصطکاک سطحی نیز به مقدار کافی عمل نکرده و با حرکت آزادانه بلوک‌ها نسبت به هم منشورها در خارج از صفحه مقاومت برشی نداشتند.

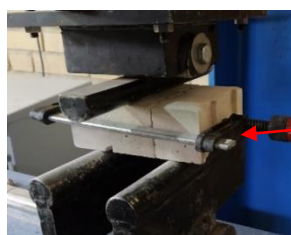
جدول ۶: نتایج آزمایش مقاومت برشی خارج از صفحه

نوع منشورها	مقاومت برشی خارج از صفحه (MPa)
با چسب	0.38
خشکه چینی	$\cong 0$



شکل ۱۹: مقاومت برش خارج از صفحه بلوک‌ها در حالت خشکه چینی

برای به دست آوردن ضریب اصطکاک بین بلوک‌ها در حالت بدون چسب با ایجاد نیروهای مختلف جانبی با استفاده از بستن تنگ و انجام آزمایش برش مستقیم برون صفحه با اعمال نیروی عمود مختلف بر سطح تماس، ضریب اصطکاک متوسط بین بلوک‌ها مقدار ۰,۷ به دست آمد. شکل ۲۰ این آزمایش را در حالت پیش بارگذاری جانبی نشان می‌دهد.



تنگ اعمال بار عمود بر
سطح تماس بلوک‌ها

شکل ۲۰: نحوه انجام آزمایش تعیین ضریب اصطکاک

مقاومت برش مستقیم برون صفحه در حالت پیوند نمونه‌های ساخته شده با چسب مقدار ۰,۳۸ مگاپاسکال بود که در مقایسه با حالت خشکه چینی چسب نقش اصلی را در تحمل برش خارج از صفحه ایفا کرده است. شکل ۲۱ نوع شکست برشی خارج از صفحه در حالت با چسب منشورها را نشان می‌دهد که می‌توان مشاهده کرد که این مقدار مقاومت برشی، مربوط به چسبندگی چسب با سطح بلوک است.



شکل ۲۱: شکست نمونه‌های آزمایش مقاومت برش مستقیم برون صفحه با چسب

۵-۵- مقاومت کشش خمشی جهت X-X منشور

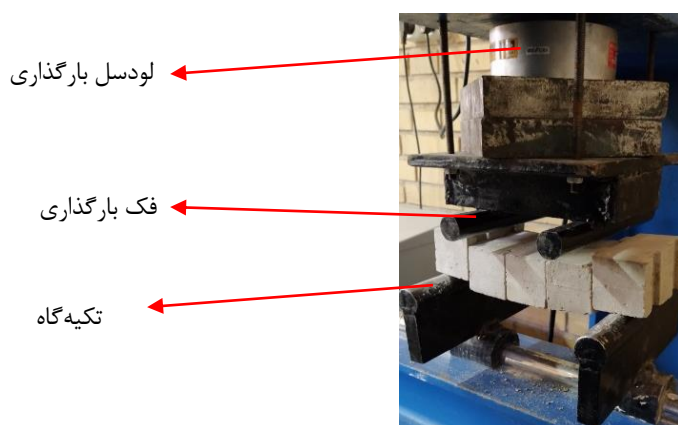
نتایج مقاومت کشش خمشی منشورهای ساخته شده در جهت X-X در دو حالت با چسب و بدون چسب در جدول ۷ ملاحظه می‌شود.

جدول ۷: نتایج آزمایش مقاومت کشش خمشی جهت X-X

نوع منشورها	مقاومت کشش خمشی جهت X-X (MPa)
با چسب	0.74
خشکه چینی	0.42

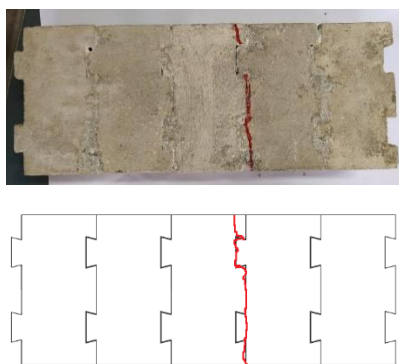
مقاومت کشش خمشی نمونه‌ها در حالت با چسب مقدار ۷۶ درصد بیشتر از نمونه‌های بدون چسب بود. با مقایسه مقاومت‌های کشش خمشی در جهت X-X می‌توان نتیجه گرفت در مقاومت کشش خمشی نمونه‌ها در حالت با چسب مقدار بخش قابل توجهی از مقاومت ناشی از عملکرد کشش خمشی زائده‌ها بود، لذا وجود زائده‌ها در بلوک‌ها مقاومت خوبی در مقابل خمش X-X از خود نشان دادند.

نحوه انجام آزمایش و شکست نمونه‌های خمشی جهت X-X در حالت بدون چسب در شکل ۲۲ نشان داده شده است. با توجه به این شکل، ابتدا نمونه‌ها در اثر بارگذاری و به علت وجود فاصله بین زائده‌های موجود در بلوک‌ها، مقداری جابجایی به سمت پایین داشتند سپس پس از درگیری زائده‌ها در یکدیگر، باربری خمشی اتفاق افتاده و ظرفیت خمشی نمونه را افزایش یافت.



شکل ۲۲: نحوه انجام آزمایش مقاومت کشش خمشی جهت X-X

نحوه شکست نمونه‌های خمشی با چسب حول محور X-X نیز در شکل ۲۳ دیده می‌شود. در این نوع شکست، پس از اعمال بارگذاری روی نمونه‌ها و ایجاد خمش در بلوک‌ها زائده‌های روی بلوک‌ها پس از درگیری در یکدیگر دچار شکست خارج از صفحه شدند.



شکل ۲۳: شکست نمونه‌های آزمایش مقاومت کشش خمشی جهت X-X

۵-۵- مقاومت کشش خمشی جهت Y-Y منشور

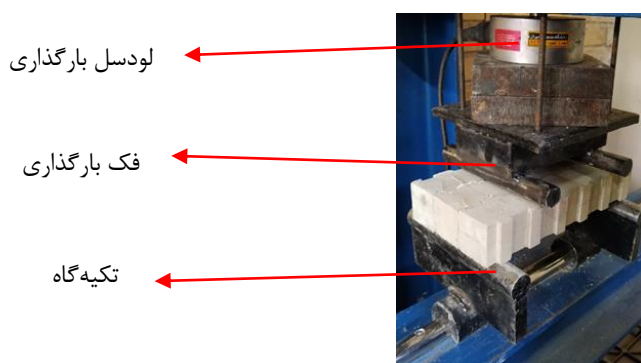
جدول ۸ نتایج مربوط به مقاومت کشش خمشی نمونه‌های خمشی ساخته شده در جهت Y-Y خارج از صفحه را با بلوک در هم قفل شونده در دو حالت استفاده از چسب و عدم استفاده از چسب برای متصل کردن بلوک‌ها در منشورهای بلوکی را نشان می‌دهد.

جدول ۸: نتایج آزمایش مقاومت کشش خمشی جهت Y-Y

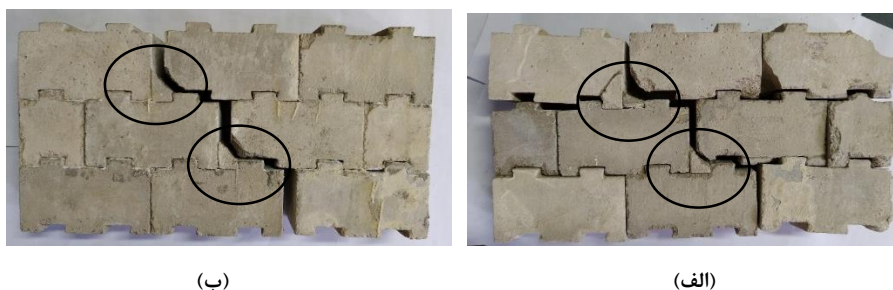
نوع منشورها	مقاومت کشش خمشی جهت Y-Y (MPa)
با چسب	0.78
خشکه چینی	0.49

از نتایج جدول ۸ می‌توان فهمید که مقاومت کشش خمشی در جهت Y-Y نمونه‌های با چسب از نمونه‌های بدون چسب به مقدار ۵۹ درصد بیشتر بوده است و بیشتر مقاومت خمشی ایجاد شده توسط زائده‌ها بوده که این امر خود دلیلی بر مؤثر بودن زائده‌های طراحی شده در تحمل خمش خارج از صفحه در جهت Y-Y می‌باشد.

شکل ۲۴، روش انجام آزمایش مقاومت کشش خمشی خرج از صفحه در جهت Y-Y را نمایش می‌دهد. نوع شکست نمونه‌های خمشی Y-Y در دو حالت موجود باهم تفاوتی نداشته (شکل ۲۵) و در دو حالت در اثر خمش، زائده‌های کناری بلوک‌ها در اثر درگیری به صوت ترد شکسته شدند که این مورد نشان از رفتار مناسب زائده‌های طراحی شده دارد.



شکل ۲۴: نحوه انجام آزمایش مقاومت کشش خمشی جهت Y-Y



شکل ۲۵: شکست نمونه‌های آزمایش مقاومت کشش خمشی جهت Y-Y (الف-خشکه چینی ب- با چسب)

۵-۶- خلاصه نتایج آزمون‌های درون صفحه و برون صفحه بلوک پیشنهادی

برای جمع‌بندی، جدول ۹ تمامی نتایج مقاومتی مربوط به آزمایش‌های انجام شده و درصد افزایش مقاومت در اثر استفاده از چسب در مقایسه با خشکه چینی (بدون چسب) را نشان می‌دهد. همچنین صرف‌نظر از اثر متقابل چسب بر درگیری مکانیکی و باربری زائده‌ها، درصد سهم مقاومت زائده‌ها به‌تنهایی به تفکیک نوع آزمایش آورده شده است. در حالت خشکه چینی با توجه به تعبیه کردن درز بین بلوک‌ها، درگیری فیزیکی زائده‌ها اثر مستقیم بر باربری مقاومت فشاری نمونه‌ها ندارد و سطح تماس تنش فشاری را منتقل می‌کند. عامل افزایش مقاومت فشاری در نمونه با چسب افزایش سطح تماس بلوک‌ها است. ولی، در سایر آزمون‌ها (به‌جز برش خارج از صفحه) قفل شونده سازوکار اصلی باربری نمونه‌های منشوری در حالت خشکه چینی است.

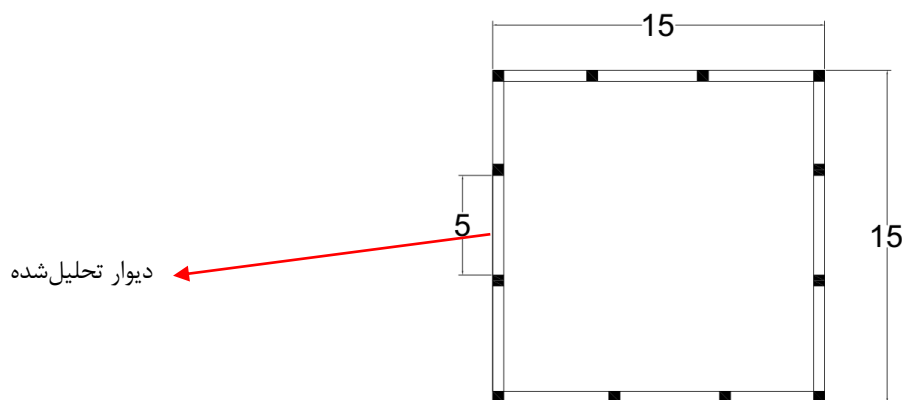
جدول ۹: خلاصه نتایج کلیه آزمون‌های درون صفحه و برون صفحه

نوع آزمون	نوع منشور	مقاومت (MPa)	درصد مشارکت زائده‌ها به تنهایی	درصد افزایش مقاومت با استفاده از چسب
فشاری	با چسب	13.4	-	37
	خشکه چینی	9.8		
کشش قطری	با چسب	0.81	55	80
	خشکه چینی	0.45		
برش داخل صفحه	با چسب	0.55	61	62
	خشکه چینی	0.34		
برش خارج از صفحه	با چسب	0.37	0	-
	خشکه چینی	0		
کشش خمشی X-X	با چسب	0.74	56	76
	خشکه چینی	0.42		
کشش خمشی y-y	با چسب	0.78	62	59
	خشکه چینی	0.49		

۶- مثال کاربردی عددی و ارزیابی بلوک پیشنهادی

برای تعیین کفایت بلوک‌های طراحی شده با ابعاد واقعی در یک ساختمان بنایی معمولی مثالی تحلیلی در ادامه آورده شده و مقاومت موردنیاز با نتایج حاصل از آزمایش‌های انجام شده مقایسه می‌شود.

ساختمان مسکونی یک طبقه موردنظر یک سازه بنایی منظم با پلانی به اندازه ۱۵ در ۱۵ متر واقع در شیراز در ساخت گاهی با زمین نوع سه و به ارتفاع ۴ متر است که پلان مطابق شکل ۲۶ می‌باشد. کلیه ضوابط مربوط به میحث هشتم مقررات ملی ساختمان مانند فاصله بین کلاف‌های قائم و ارتفاع طبقه رعایت شده است. لازم به ذکر است که برای تحلیل در جهت درون صفحه از نیروی جانبی زلزله و برای تحلیل خارج از صفحه از نیروی باد استفاده می‌شود و کلیه پارامترهای موردنظر برای بارگذاری در جهت اطمینان و دست بالا گرفته شدند. تحلیل انجام شده روی یک پنل دیوار ۵ در ۴ متری بین دو کلاف قائم انجام شد و به دلیل متقارن بودن سازه فقط دیوار یک جهت (جهت y) تحلیل شد. در مقیاس واقعی ضخامت دیوار ۱۵۰ میلی‌متر لحاظ گشت.



شکل ۲۶: پلان و دیوار موردنظر مثال کاربردی

نتایج حاصل از بارگذاری و تحلیل تلاش‌های درون صفحه و خارج از صفحه به ترتیب در جداول ۱۰ و ۱۱ خلاصه شده است.

جدول ۱۰: نتایج تحلیل درون صفحه مثال کاربردی

تنش برش درون صفحه (MPa)	تنش فشاری (MPa)		سهم نیروی یک دیوار	نیروی برش پایه	وزن لرزه‌ای	ضریب برش پایه
	تحلیل	آزمایش				
0.34	0.22	خشکه چینی	* $V_{wall} = \frac{1}{6} * 48 = 8 \text{ ton}$	$V = CW$ $V = 48 \text{ ton}$	$DL = 600 \text{ kg/m}^2$ $LL = 200 \text{ kg/m}^2$ $W = 181.8 \text{ ton}$	$C = \frac{ABI}{R}$ $C = \frac{0.3 * 2.64 * 1}{3} = 0.264$
		0.45				
		**0.12				

* محاسبه مقدار نیروی سهم دیوار در جهت اطمینان با فرض نبود دیوارهای داخلی انجام شده است.

$$\frac{P}{W * t} \text{ ***}$$

$$\frac{P}{\left(\frac{W+H}{2}\right) * t} \text{ **}$$

جدول ۱۱: نتایج تحلیل خارج از صفحه مثال کاربردی

نیروی باد	نیروی خمی دیوار		لنگر خمی بیشینه دیوار		تنش خمی x-x (MPa)		تنش خمی y-y (MPa)		
	جهت x-x	جهت y-y	جهت x-x	جهت y-y	تحلیل	آزمایش	تحلیل	آزمایش	
$P = I_w q C_e C_p C_q$ $P = 245 \text{ N/m}^2$	$q = p * 5 = 1225 \text{ N/m}^2$	$q = p * 4 = 980 \text{ N/m}^2$	$M_{max} = \frac{ql^2}{8} = 2450 \text{ N.m}$	$M_{max} = \frac{ql^2}{8} = 3062 \text{ N.m}$	*0.13	خشکه چینی	**0.2	خشکه چینی	0.49
						0.42		0.78	

$$\frac{M_{x-x} C}{I_x}$$

$$\frac{M_{y-y} C}{I_y} \text{ **}$$

با وجود ساده‌سازی و چشم‌پوشی از اثرات اندرکنشی در تخمین تنش‌های حاصل از بارهای ثقلی، باد و زلزله در دیوار بنایی، مقاومت فراهم‌شده توسط بلوک در هم قفل‌شونده پیشنهادی حتی در حالت خشکه‌چینی به مراتب بیش از مقاومت موردنیاز است. در حالت استفاده از بلوک قفل‌شونده با چسب، کمینه ضریب اطمینان موجود در برابر تلاش‌های مختلف بر اساس جداول ۱۰ و ۱۱ برابر ۳/۹ است.

۷- جمع‌بندی

با بررسی و جمع‌بندی نتایج حاصل در این مطالعه آزمایشگاهی می‌توان به نتایج زیر دست یافت:

- ۱- در تمامی آزمایش‌های منشورهای بلوکی ساخته‌شده با بلوک در هم قفل‌شونده، مقاومت اندازه‌گیری شده در حالت با چسب بیشتر از حالت بدون چسب می‌باشد.
- ۲- در تمامی آزمایش‌ها، زائده‌های طراحی‌شده بلوک‌های ابداعی به‌خوبی ایفای نقش کردند و عملکرد مناسب و یکسانی را در جهت بهبود رفتار منشورهای بلوکی هم در جهت درون صفحه و هم در جهت برون صفحه داشتند.
- ۳- با مقایسه نتایج منشورهای بدون چسب و درصد مشارکت زائده‌ها به‌تنهایی در حالت خشکه‌چینی، نتیجه گرفته شد که بلوک ابداعی جهت خشکه‌چینی نیز مناسب ارزیابی می‌گردد و رفتار قابل قبولی را از خود نشان می‌دهد. در نتیجه می‌توان بلوک قفل‌شونده را هم به‌صورت خشکه‌چینی و هم به‌صورت استفاده از ماده چسبنده استفاده کرد.

- ۴- بیشترین تأثیر مقاومتی استفاده از چسب در منشورهای بلوکی در بین آزمایش‌های انجام‌شده، مربوط به آزمایش مقاومت کشش قطری و کمترین تأثیر آن مربوط به آزمایش مقاومت فشاری بود.
- ۵- زائده‌های موجود روی بلوک‌ها بیشترین نقش رفتاری را در آزمایش کشش خمشی حول محور $y-y$ و کمترین نقش رفتاری را در آزمایش مقاومت کشش قطری داشتند.
- ۶- در آزمایش مقاومت برش مستقیم، منشورهای بلوکی دربرش درون صفحه عملکرد بهتری را نسبت به برش خارج از صفحه از خود نشان دادند.
- ۷- در آزمایش خمش خارج از صفحه، درکل بلوک‌های ابداعی عملکرد بهتری را در جهت $y-y$ داشت و استفاده از چسب در خمش جهت $x-x$ عملکرد بهتر و زائده‌های تعبیه‌شده روی بلوک‌ها در خمش جهت $y-y$ عملکرد بهتری را داشتند.
- ۸- فاصله موجود بین زائده‌ها و شیار تعبیه‌شده روی بلوک‌ها باعث افزایش جابجایی نهایی، باعث قابلیت قرار گرفتن چسب بین بلوک‌ها و در نتیجه عملکرد مناسب رفتاری بین چسب و زائده به‌صورت هم‌زمان شد. لیکن، در آزمایش‌های فشاری و کشش خمشی جهت $y-y$ این فاصله باعث زوال ترد و ناگهانی نمونه‌ها شد.
- ۹- استفاده و یا عدم استفاده از چسب در نوع شکست نمونه‌ها به‌جز حالت فشاری تغییری ایجاد نکرد و نوع شکست نمونه‌ها در حالت با چسب و بدون چسب شبیه به هم بودند.
- ۱۰- با بررسی مثال کاربردی، دیوارهای بنایی ساخته‌شده از بلوک‌های پیشنهادی با ضریب اطمینان مناسبی دارای توانایی تحمل تلاش‌های طراحی در تنش‌های درون و برون صفحه ارزیابی می‌شوند.

مراجع

- [1] Shakir, A. A., & Mohammed, A. A. (2013). Manufacturing of Bricks in the Past, in the Present and in the Future: A state of the Art Review. *International Journal of Advances in Applied Sciences*, 2(3), 145-156.
- [2] Allen, E., Thallon, R., & Schreyer, A. C. (2017). *Fundamentals of residential construction*. John Wiley & Sons.
- [3] Thallon, R. (1983). Dry-Stack Block. *Fine Homebuilding Magazine*, 50-57.
- [4] Ali, M., Gultom, R. J., & Chouw, N. (2012). Capacity of innovative interlocking blocks under monotonic loading. *Construction and Building Materials*, 37, 812-821.
- [5] Kumar, T. P., & Vigneshvar, R. (2014). Development of an Innovative Interlock Blocks. *ISSN: 2349-8404; ISSN: 2349-879X*, 1(5).
- [6] Fay, L., Cooper, P., & de Moraes, H. F. (2014). Innovative interlocked soil-cement block for the construction of masonry to eliminate the settling mortar. *Construction and Building Materials*, 52, 391-395.
- [7] Ayed, H. B., Limam, O., Aidi, M., & Jelidi, A. (2016). Experimental and numerical study of Interlocking Stabilized Earth Blocks mechanical behavior. *Journal of Building Engineering*, 7, 207-216.
- [8] Ma, H., Ma, Q., & Gaire, P. (2020). Development and mechanical evaluation of a new interlocking earth masonry block. *Advances in Structural Engineering*, 23(2), 234-247.
- [9] Maïni, S. (2005). Earthen architecture for sustainable habitat and compressed stabilised earth block technology. *The Auroville Earth Institute, Auroville Building Center-India*.
- [10] Uzoegbo, H. C., & Ngowi, J. V. (2003). Structural behaviour of dry-stack interlocking block walling systems subject to in-plane loading. *Concr Beton*, 103, 9-13.
- [11] Sturm, T., Ramos, L. F., & Lourenço, P. B. (2015). Characterization of dry-stack interlocking compressed earth blocks. *Materials and Structures*, 48(9), 3059-3074.
- [12] Castro, I. G., Laursen, P. T., Jansen, D. C., & Qu, B. (2014). Performance of interlocking compressed earth block infill in confined masonry construction. *10th US*.

- [13] Thanoon, W. A., Jaafar, M. S., Kadir, M. R. A., Ali, A. A. A., Trikha, D. N., & Najm, A. M. (2004). Development of an innovative interlocking load bearing hollow block system in Malaysia. *Construction and Building Materials*, 18(6), 445-454.
- [14] Osman, S. A., Mohamed, Z. S., Sulaiman, A. R., & Ismail, M. F. (2014). *Experimental analysis of Interlocking load bearing wall brickool system* (Vol. 594, pp. 439-443). Trans Tech Publications Ltd.
- [15] Yousef, A. M., Muda, Z. C., Naganathan, S., Beddu, S., & Jamali, S. (2017). Behaviour of Post-tensioned Interlocking Bricks for Masonry Wall Subjected to Out-of-plane Loads. *Indian Journal of Science and Technology*, 10, 21.
- [16] Jeslin, A. J., & Padmanaban, I. (2020). Experimental studies on interlocking block as wall panels. *Materials Today: Proceedings*, 21, 1-6.
- [17] Afzal, Q., Abbas, S., Abbass, W., Ahmed, A., Azam, R., & Riaz, M. R. (2020). Characterization of sustainable interlocking burnt clay brick wall panels: An alternative to conventional bricks. *Construction and Building Materials*, 231, 117190.
- [18] Anand, K. B., & Ramamurthy, K. (2001). Influence of construction method on water permeation of interlocking block masonry. *Journal of architectural engineering*, 7(2), 52-56.
- [19] Anand, K. B., & Ramamurthy, K. (2003). Laboratory-based productivity study on alternative masonry systems. *Journal of construction engineering and management*, 129(3), 237-242.
- [20] Anand, K. B., Vasudevan, V., & Ramamurthy, K. (2003). Water permeability assessment of alternative masonry systems. *Building and Environment*, 38(7), 947-957.
- [21] Anand, K. B., & Ramamurthy, K. (2005). Development and evaluation of hollow concrete interlocking block masonry system. *The Masonry Society Journal*, 23(1), 11-19.
- [22] Qamar, F., Thomas, T., & Ali, M. (2020). Improvement in lateral resistance of mortar-free interlocking wall with plaster having natural fibres. *Construction and Building Materials*, 234, 117387.
- [23] Al-Fakih, A., Wahab, M. A., Mohammed, B. S., Liew, M. S., Zawawi, N. A. W. A., & As'ad, S. (2020). Experimental study on axial compressive behavior of rubberized interlocking masonry walls. *Journal of Building Engineering*, 29, 101107.
- [24] ASTM C109-07. (2007). Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars. Annual book of ASTM standards. West Conshohocken, PA, USA: American Society of Testing Materials.
- [25] ASTM C348. (1997). Test method for flexural strength of hydraulic mortar. Annual book of ASTM standards. West Conshohocken, PA, USA: American Society of Testing Materials.
- [26] ASTM C1437. (2007). Standard Test Method for Flow of Hydraulic Cement Mortar. Annual book of ASTM standards. West Conshohocken, PA, USA: American Society of Testing Materials.
- [27] ASTM C1314. (2010). Standard Test Method for Compressive Strength of Masonry Prisms. Annual book of ASTM standards. West Conshohocken, PA, USA: American Society of Testing Materials.
- [28] ASTM E519. (2012). Standard Test Method for Diagonal Tension (Shear) in Masonry Assemblages. Annual book of ASTM standards. West Conshohocken, PA, USA: American Society of Testing Materials.
- [29] De Vekey, R. C. (1996). Determination of shear strength index for masonry unit/mortar junction. *Matériaux et constructions*, 29(192), 459-463.
- [30] ASTM E518. (2003). Standard Test Methods for Flexural Bond Strength of Masonry. Annual book of ASTM standards. West Conshohocken, PA, USA: American Society of Testing Materials.
- [31] Anand, K. B., & Ramamurthy, K. (2000). Development and performance evaluation of interlocking-block masonry. *Journal of Architectural Engineering*, 6(2), 45-51.
- [32] Dehghan, S. M., Najafgholipour, M. A., Baneshi, V., & Rowshanzamir, M. (2018). Mechanical and bond properties of solid clay brick masonry with different sand grading. *Construction and Building Materials*, 174, 1-10.
- [33] Reddy, B. V., & Gupta, A. (2008). Influence of sand grading on the characteristics of mortars and soil-cement block masonry. *Construction and Building Materials*, 22(8), 1614-1623.