Journal of Structural and Construction Engineering, 8(11), 2022, pp. 5-24

Journal of Structural and Construction Engineering

www.jsce.ir

Experimental Study on Effect of Brick and Mortar Types on Mechanical Properties of Masonry Prisms

Seyed Mehdi Dehghan[1*], Vahid Baneshi[2], Sadollah Yousefi Kahnooj[3], Mohammad Amir Najafgholipuor[1]

1- Associate Professor, Faculty of Civil and Environmental Engineering, Shiraz University of Technology, Shiraz, Iran
2 -PhD Student in Earthquake Engineering, Faculty of Civil and Environmental Engineering, Shiraz University of Technology, Shiraz, Iran
3 -M.Sc. Student in Earthquake Engineering, Faculty of Civil and Environmental Engineering, Shiraz University of Technology, Shiraz, Iran

ABSTRACT

Brick and mortar are two main materials which have great influence on the behavior of masonry structures. Nowadays, bricks with different shapes, ingredients and strength and mortars with various strength characteristics are used in construction, where this diversity may confuse engineers to choose these two types of materials properly. In this experimental study, using two conventional types of solid and hollow burnt clay bricks in masonry construction of Iran and two types of strong and weak cement-sand mortars, standard tests were performed to determine and to compare the mechanical properties of masonry prisms, including compressive strength and diagonal-tensile (shear) strength and brick-mortar bond properties including flexural tensile and direct shear strengths. The results showed that the compressive strength of brick prism, the diagonal-tensile strength of brick panel, and direct shear strength of brick prism are more sensitive to the type of mortar compared to the shape of brick. Moreover, the flexural tensile bonding properties of brick prisms, due to presence of holes in the bricks and the possible interlocking, is more sensitive to the shape of brick compared to the mortar type. In general, among all the studied cases masonry specimens with hollow bricks and strong mortar have better performance.

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

ARTICLE INFO

Receive Date: 12 October 2020
Revise Date: 04 December 2020
Accept Date: 05 February 2021

Keywords:
Brick-mortar bond
Burnt clay Brick
Masonry wall
Mechanical Properties
Mode of Failure
Strong and Weak Mortar

doi: https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2021.252499.2259

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

نشریه مهندسی سازه و ساخت
(علمی - پژوهشی)
www.jsce.ir

بررسی آزمایشگاهی تأثیر نوع آجر و ملات بر مشخصات مکانیکی منشورهای بنایی

سید مهدی دهقان[1*]، وحید بانشی[2]، سعدالله یوسفی کهنوج[3]، محمدامیر نجفقلی‌پور[1]

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

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

۳- کارشناسی ارشد مهندسی زلزله، دانشکده مهندسی عمران و محیط‌زیست، دانشگاه صنعتی شیراز، شیراز، ایران

چکیده

آجر و ملات دو مصالح اصلی و تأثیرگذار بر رفتار سازه‌های بنایی هستند. امروزه، آجرهای مختلفی ازنظر جنس، هندسه و مقاومت و ملات ها با مشخصات مقاومتی متفاوت در ساخت‌وساز مورداستفاده قرار می‌گیرند که تنوع موجود در انتخاب نوع آجر و عیار ملات می‌تواند مهندسان را در انتخاب مناسب این دو نوع مصالح دچار سردرگمی کند. در این مطالعه آزمایشگاهی، با استفاده از دو نوع آجر رسی پخته توپر (گری) و رسی سوراخ‌دار (سه گل) مرسوم در ساخت سازه‌های بنایی ایران و دو نوع ملات ماسه سیمانی قوی و ضعیف آزمون‌های استاندارد جهت تعیین و مقایسه مشخصات مکانیکی منشورهای بنایی حاصل صورت گرفت که شامل آزمایش‌های مقاومت فشاری، مقاومت کشش قطری (برشی) و مشخصات چسبندگی اتصال آجر و ملات (مقاومت کشش خمشی و مقاومت برش مستقیم) بود. نتایج حاصل در این مطالعه بررسی شد و بر این اساس مقاومت فشاری منشورهای آجری، مقاومت کشش قطری پانل‌های آجری و مقاومت برش مستقیم منشورهای آجری حساسیت بیشتری به نوع ملات در مقایسه با شکل آجر دارند. همچنین، مشخصات چسبندگی کشش خمشی اتصال آجر و ملات در منشورهای آجری به دلیل وجود سوراخ و امکان قفل شوندگی بین آجرها حساسیت بیشتری به شکل آجر در مقایسه با نوع ملات دارد. درمجموع، بین تمام حالت‌های موردبررسی نمونه‌های بنایی با آجرهای سوراخ‌دار با ملات قوی عملکرد بهتری را داشتند.

کلمات کلیدی: آجر رسی پخته، چسبندگی آجر و ملات، دیوار بنایی، ملات قوی و ضعیف، مشخصات مکانیکی، نوع شکست.

سابقه مقاله:					
دریافت	بازنگری	پذیرش	انتشار آنلاین	چاپ	شناسه دیجیتال:
۱۳۹۹/۰۷/۲۱	۱۳۹۹/۰۹/۱۴	۱۳۹۹/۱۱/۱۷	۱۳۹۹/۱۱/۱۷	۱۴۰۰/۱۱/۳۰	doi: https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2021.252499.2259
					doi: 10.22065/jsce.2021.252499.2259

*نویسنده مسئول: سید مهدی دهقان

پست الکترونیکی: smdehghan@sutech.ac.ir

۱- مقدمه

سازه‌های بنایی به‌عنوان شیوه ساخت و سازی باستانی، از کنار هم قرار گرفتن منظم واحدهای بنایی و چسباندن با ملات ساخته می‌شوند. سازه‌های بنایی سابقه دیرینه‌ای دارند و در سرتاسر جهان به دلایل مختلفی مانند دوام، ارزان و در دسترس بودن مصالح، مقاومت فشاری مناسب و سهولت ساخت استفاده می‌شوند و همچنان در بسیاری از مناطق به‌ویژه در کشورهای درحال‌توسعه به‌عنوان سازه مرسوم به‌حساب می‌آیند. ساختمان‌های بنایی از نظر تحمل بارهای ثقلی جز سازه‌های بادوام و از نظر تحمل بارهای جانبی جز سازه‌های ضعیف هستند. به همین دلیل لازم است مصالح مورداستفاده در سازه‌های بنایی مانند ملات و آجر، کیفیت، مقاومت و رفتار مناسبی داشته باشند تا عملکرد مطلوبی را از خود نشان دهند.

رفتار سازه‌های بنایی متأثر از مشخصات و ویژگی‌های عناصر سازنده آن (آجر و ملات) است که امروزه به دلیل تنوع مصالح بنایی موجود از جمله هندسه و جنس‌های مختلف آجر و انواع ملات‌های قابل کاربرد، شناخت این نوع رفتار بیش‌ازپیش اهمیت یافته است. در ساخت‌وساز بنایی مدرن، دسترسی مناسب به واحدهای بنایی باکیفیت، شکل و ابعاد یکنواخت مانند آجرهای پخته رسی ضروری است. در حال حاضر، انواع آجر رسی با هندسه، ابعاد و مشخصات مکانیکی متفاوت در بازار مصالح ساختمانی در دسترس است که باعث می‌شود طراحان، سازندگان و مسئولین فنی در انتخاب مصالح مناسب دچار سردرگمی شوند. از سوی دیگر، مشخصات و نحوه کاربرد واحدهای بنایی در کشورهای مختلف بر اساس مصالح موجود و روش اجرا، متفاوت است، لذا نتایج حاصل در تحقیقات بین‌المللی روی سازه‌های بنایی به‌طور کامل قابل‌تعمیم به مناطق مختلف از جمله ایران نخواهد بود. مطالعات متنوعی در سراسر دنیا درزمینه مشخصات مکانیکی و چسبندگی منشورهای آجری انجام‌شده است که به‌صورت خلاصه در ادامه به شرح آن‌ها می‌پردازیم.

کاوشیک و همکاران در مورد مشخصات تنش-کرنش و مقاومت فشاری و رفتار سازه‌های بنایی ساخته‌شده با آجرهای پخته‌شده رسی دست‌ساز تحقیق کردند و مدل‌های تحلیلی را برای به دست آوردن منحنی‌های غیرخطی تنش-کرنش سازه‌های بنایی را به دست آوردند [۱]. گوماست رفتار مقاومت فشاری واحدهای بنایی ساخته‌شده از دو نوع آجر (آجر قالبی و آجر معمولی) با پنج نوع ملات مختلف را بررسی کردند و روابط تجربی بر اساس مقاومت فشاری ملات و آجر برای واحدهای بنایی موردمطالعه به دست آوردند [۲]. وو و همکاران رفتار تنش کرنش فشاری تک‌محوره بر مقاومت فشاری بلوک منشورهای آجرکار را با ترکیبات ملات مختلف بررسی و مشاهده کردند که مقاومت فشاری، مدول ارتجاعی و ضریب پوآسون بلوک منشورهای آجرکار تحت تأثیر نسبت مقاومت فشاری ملات بر مقاومت فشاری بلوک‌ها است [۳].

محمد و همکاران مشخصات مکانیکی منشورهای آجرکار ساخته‌شده از بلوک‌های توخالی بتنی را تحت بارمحوری فشاری بررسی کردند. در این تحقیق از دو نوع آجر توپر و بلوک‌های بتنی توخالی و چهار نوع ملات ماسه-سیمان-آهکی برای ساخت نمونه‌ها استفاده شد. هدف از این تحقیق برداشت نمودارهای تنش-کرنش و نحوه شکست نمونه‌ها بود. پس از انجام آزمایش به این نتایج رسیدند که ملات مورداستفاده بر رفتار غیرخطی منشورهای آجری تأثیر می‌گذارد و نوع ملات در کرنش محوری و نوع شکست واحدهای بنایی نقش دارد [۴]. سینگ و مونجال تأثیر انواع ملات و نوع آجر را بر مقاومت فشاری و مقاومت چسبندگی اتصال منشورهای آجرکار را بررسی کردند. در این تحقیق با استفاده از ۴ نوع آجر رسی و بتنی و سه نوع ملات سیمانی و آهکی، آزمایش‌های مقاومت فشاری منشور آجری، مقاومت برش مستقیم و مقاومت کشش خمشی اتصال انجام شد و نتایج حاصل نشان داد که مقاومت فشاری منشور آجرکار با مقاومت فشاری ملات و واحد بنایی متناسب است و همچنین آجرهای بتنی مقاومت چسبندگی پایینی نسبت به آجر رسی دارند [۵].

سارانگاپانی مقاومت چسبندگی خمشی و برشی منشورهای آجرکار با چهار نوع آجر و ملات محلی را مورد آزمایش قراردادند و مشاهده کردند که مقاومت چسبندگی زمانی که از پوشش اپوکسی به‌عنوان ماده افزایش مقاومت به ملات اضافه می‌شود، چهار برابر از حالت عادی بیشتر می‌شود [۶]. ساتیپاران و همکاران مشخصات مکانیکی منشورهای آجرکار شامل مقاومت فشاری منشورهای آجرکار و مشخصات چسبندگی اتصال واحدهای بنایی شامل مقاومت برش مستقیم و خمشی اتصال ملات را با در نظر گرفتن تأثیر درصد حفره‌های واحدهای توخالی واحدهای بنایی را موردمطالعه قراردادند. نتایج حاصل از کار نشان داد که مقاومت فشاری منشورهای آجرکار به‌سرعت با

افزایش درصد حفره‌های بلوک‌ها، کاهش می‌یابد و همچنین مقاومت برشی و خمشی اتصال ملات نیز با افزایش حفره‌های موجود، کاهش می‌یابد [۷]. تامبو با آزمایش‌های انجام‌شده روی منشورهای آجرکار مشاهده کردند که واحدهای آجری با سطح صاف در مقایسه با سطوح زبر، دارای مقاومت چسبندگی بالاتری (چسبندگی خمشی و برشی) هستند [۸]. تامبو در تحقیقی دیگر، با مقایسه شرایط مختلف عمل‌آوری نمونه‌های خود دریافت، نمونه‌ها در شرایط عمل‌آوری خشک در مقایسه با شرایط عمل‌آوری مرطوب، مقاومت چسبندگی بین ملات و آجر بیشتری دارند [۹].

ردی و گوپتا تأثیر دانه‌بندی ماسه را با انتخاب سه دانه‌بندی مختلف بر مشخصات مکانیکی ملات و مصالح بنایی بررسی کردند. در این تحقیق، آزمایش‌های فشاری و خمشی و روانی نمونه ملات و مقاومت کششی اتصال و مقاومت فشاری منشور آجرکاری انجام شد. نتایج نشان داد که ملات با ماسه ریز برای رسیدن به ثبات و کارایی به آب بیشتری نیاز دارد، مقاومت فشاری و مدول ملات با ریز شدن ماسه کاهش می‌یابد، ریز بودن ماسه مقاومت کششی اتصال مصالح بنایی را کاهش می‌دهد ولی مقاومت فشاری چندان حساس نیست [۱۰]. دهقان و همکاران تأثیر دانه‌بندی ماسه را بر مقاومت مکانیکی شامل مقاومت فشاری و تنش برشی (کشش قطری) و مقاومت چسبندگی شامل مقاومت خمشی و برشی منشورهای ساخته‌شده از آجر رسی توپر رایج در سازه‌های بنایی ایران را موردمطالعه قراردادند و مشاهده کردند که با تغییر ماسه از درشت به ریز مشخصات مکانیکی و چسبندگی منشورهای آجرکار کاهش می‌یابد. همچنین روابطی را برای تخمین مقاومت فشاری منشورهای آجرکار بر اساس مقاومت آجر و ملات تعیین کردند [۱۱]. تامبو با استفاده از یک آجر توپر رسی و دو نوع ملات پلیمری جدید با مقاومت فشاری مختلف آزمایش‌های مقاومت کششی اتصال، مقاومت برشی اتصال، مقاومت خمشی و مقاومت فشاری منشورهای آجرکار را انجام داد. نتایج نشان داد که مقاومت برشی، خمشی و کششی منشورهای ساخته‌شده با ملات قوی‌تر در مقایسه با ملات ضعیف عملکرد بهتری داشتند [۱۲]. ژیائو و همکاران با استفاده از یک نوع سرباره قلیایی فعال یک بلوک سیمانی توخالی ساخته و با استفاده از منشورهای ساخته‌شده با بلوک خود آزمایش‌های برشی، خمشی و کشش اتصال را انجام دادند. در ساخت منشورهای خود از ملات با مقاومت فشاری و در عیارهای مختلف استفاده کردند و پس از انجام آزمایش نتیجه گرفتند که مقاومت‌های اتصال اندازه‌گیری شده ارتباط مستقیمی با مقاومت فشاری ملات پیشنهادی دارند و رابطه‌هایی را جهت تخمین مقاومت برشی، کششی و خمشی اتصال منشورهای بلوکی را با مقاومت فشاری ملات خود پیشنهاد دادند [۱۳]. اندو و همکاران آزمایش‌های مقاومت فشاری قطری، مقاومت فشاری دارای خروج از مرکزیت و مقاومت خمشی اتصال منشورهای ساخته‌شده در ابعاد واقعی را با استفاده از آجرهای تولیدشده از ضایعات ساختمانی و ملات ساخته‌شده با خاک گلدانی در عیارهای مختلف انجام دادند. نتایج نشان داد که مقاومت‌های اندازه‌گیری شده دارای عملکرد ضعیفی بودند ولی با اضافه کردن الیاف فولادی می‌توان مقاومت‌های منشورهای ساخته‌شده را افزایش داد [۱۴].

باوجود مطالعات مختلفی در مورد مشخصات واحدهای بنایی، هنوز شناخت محدودی از این نوع سازه‌ها با توجه به مصالح بومی و محلی وجود دارد. هدف پژوهش حاضر بررسی مقاومتی و رفتاری اثر نوع آجر و رده ملات بر مشخصات مکانیکی منشورهای آجرکار شامل مقاومت فشاری، مقاومت کشش قطری و مشخصات چسبندگی بین آجر و ملات شامل مقاومت چسبندگی خمشی و چسبندگی برشی با استفاده از دو نوع آجر رایج رسی توپر (گری) و سوراخ‌دار (سه‌گل) و دو نوع ملات ماسه سیمانی با عیارهای مختلف (نماینده ملات قوی و ضعیف) است که می‌تواند تأثیر بسزایی بر شناخت مشخصات رفتاری این دو نوع آجر مرسوم در سازه‌های بنایی ایران و انتخاب آن‌ها از سوی سازندگان و مهندسان طراح داشته باشد.

۲- برنامه آزمایشگاهی

در این پژوهش، تأثیر نوع آجر و ملات بر عملکرد واحدهای بنایی ساخته‌شده شامل مشخصات مقاومت فشاری، مقاومت کشش قطری، چسبندگی کشش خمشی و چسبندگی برشی بررسی شد. برای این منظور از دو نوع آجر رسی توپر و سوراخ‌دار و دو نوع ملات ضعیف و قوی مختلف استفاده شد. در این بخش به معرفی مشخصات مصالح مصرفی، روش آماده‌سازی نمونه‌ها و نحوه انجام آزمایش‌های استاندارد پرداخته می‌شود.

۲-۱- مصالح مصرفی

برای ساخت ملات‌ها در این تحقیق از سیمان پرتلند نوع ۲ کارخانه آباده فارس با مشخصات مطابق با استاندارد ASTM C150 [۱۵] استفاده شد. ماسه مصرفی جهت ساخت ملات‌ها از ماسه طبیعی رودخانه‌ای معدن دوکوهک شیراز انتخاب شد. این ماسه دارای مدول نرمی ۲/۳ و با بیشینه قطر ۲ میلی‌متر است که پس از سرند نمودن در محدوده دانه‌بندی استاندارد ASTM C144 [۱۶] قرار گرفت.

به‌منظور بررسی نوع آجر و ملات بر مشخصات مکانیکی و چسبندگی منشورهای آجری، دو نوع ملات با نسبت حجمی ماسه به سیمان (۱:۳) و (۱:۵) که با ملات‌های قوی و ضعیف نام‌گذاری شده‌اند با مشخصات جدول ۱ ساخته و استفاده شد. در این جدول مشخصات مکانیکی و روانی ملات‌ها شامل مقاومت فشاری و مدول ارتجاعی ارائه‌شده است. نسبت‌های آب به سیمان در این جدول بر مبنای دستیابی به روانی استاندارد ۵±۱۱۰ درصد طبق استاندارد ASTM C109 [۱۷] به روش سعی و خطا در آزمایشگاه بر اساس استاندارد ASTM C1437 [۱۸] به دست آمدند.

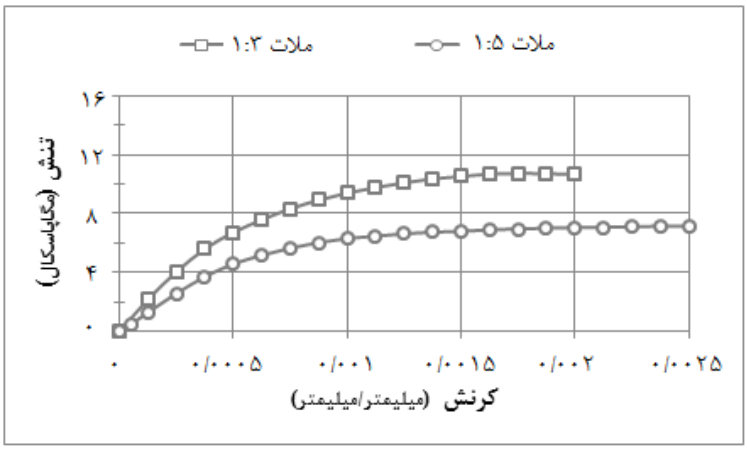
مقاومت فشاری ملات‌ها مطابق با استاندارد ASTM C109 در قالب‌های مکعبی ۵۰ میلی‌متری (شکل ۱) در شرایط عمل‌آوری مشابه با نمونه‌های منشور آجری به تعداد ۳ عدد برای هر نوع طرح اختلاط ساخته و میانگین آن‌ها در جدول ۱ گزارش شدند. برای محاسبه مدول ارتجاعی ملات‌ها از نمونه‌های استوانه‌ای ۱۵۰×۳۰۰ میلی‌متری طبق استاندارد ASTM C469 [۱۹] و از محفظه تعیین مدول ارتجاعی مطابق با شکل ۲ استفاده شد. برای تعیین مدول ارتجاعی در این تحقیق تعداد ۳ نمونه برای هر حالت ساخته شد و میانگین آن‌ها نیز گزارش شد. شکل ۳ نمودار تنش-کرنش ملات‌های موردبررسی در این پژوهش را نشان می‌دهد.

شکل ۱: روش تعیین مقاومت فشاری ملات

شکل ۲: نحوه تعیین مدول ارتجاعی

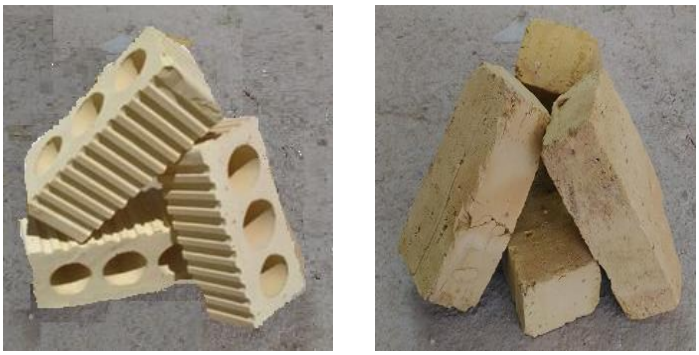
جدول ۱: ترکیب و مشخصات مکانیکی و روانی ملات‌ها

نوع ملات		W/C	روانی (%)	مقاومت فشاری (*MPa*)	مدول ارتجاعی (*GPa*)
(ماسه : سیمان)	۱:۳	۰/۷۷	۱۰۶	۱۱/۱	۱۳/۲
	۱:۵	۱/۱	۱۰۸	۵/۳	۹/۳



شکل ۳: منحنی تنش-کرنش ملات‌ها

برای ساخت منشورهای آجرکار دو نوع آجر رسی توپر و آجر سوراخ‌دار که در ساخت‌وساز سازه‌های بنایی در ایران متداول هستند، مورداستفاده قرار گرفتند. آجرها از مصالح ساختمانی متعارف باکیفیت در استان فارس انتخاب شدند و از محصولاتی بهره گرفته شد که علاوه بر وضع ظاهری مناسب و عاری بودن از ترک‌خوردگی، یکنواختی قابل قبولی در ابعاد داشته باشند. در فرآیند ساخت مدرن آجر رسی، خاک رس مناسب پس از آماده‌سازی با مقدار مناسب آب، ترکیب و گل حاصل به‌صورت نیمه‌خودکار در قالب ریخته شده، خشک‌شده و در کوره پخته می‌شود. ابعاد تقریبی (طول×عرض×ارتفاع) آجرهای توپر گری 210×100×70 میلی‌متر است. آجرهای سوراخ‌دار سه‌گل دارای ابعاد تقریبی (طول×عرض×ارتفاع) 180×84×72 میلی‌متر با سه سوراخ به میانگین قطر ۴۰ میلی‌متر با میانگین مساحت سطح حفرات ۲۶ درصد است. شکل ۴ این دو نوع آجر را نشان می‌دهد.



شکل ۴: آجر توپر (گری) و سوراخ‌دار (سه‌گل) مورداستفاده در ساخت منشورهای آجرکار

آزمایش‌های استاندارد آجر طبق ASTM C67 [۲۰] شامل مقاومت فشاری، مقاومت خمشی و درصد جذب آب روی این آجرها انجام شد (شکل ۵). آزمایش‌های استاندارد آجر مانند مقاومت فشاری، خمشی و درصد جذب آب در دو حالت خشک و اشباع (۲۴ ساعت نگهداری به‌صورت غوطه‌وری در آب سرد) بر روی ۱۰ عدد آجر در هر حالت انجام شدند. میانگین مقاومت فشاری و خمشی آجرها در جدول ۲ مشاهده می‌شود. همچنین درصد جذب آب برای آجر توپر و سوراخ‌دار به ترتیب ۱۸/۵ و ۱۶ درصد است.

شکل ۵: آزمایش مقاومت فشاری و مقاومت خمشی آجر

جدول ۲: مشخصات مکانیکی آجرهای توپر و سوراخ‌دار

نوع آجر	حالت نمونه	مقاومت فشاری (*MPa*)	مقاومت خمشی (*MPa*)
آجر رسی توپر	خشک	۱۳/۹	۳/۱۴
	اشباع	۱۳/۳	۲/۵۳
آجر رسی سوراخ‌دار	خشک	۲۳/۰	۱۰/۵
	اشباع	۲۰/۴	۷/۰۸

۲-۲- آماده‌سازی نمونه‌های منشور آجرکار

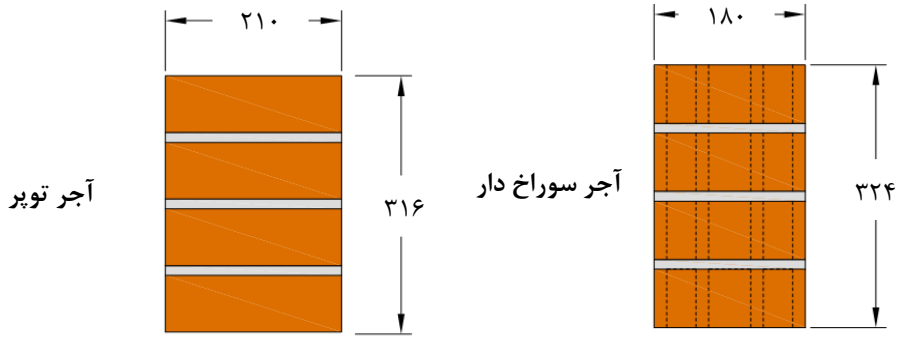
در این تحقیق، به‌منظور بررسی تأثیر نوع آجر و نوع ملات بر مشخصات مکانیکی و چسبندگی منشورهای آجرکار ساخت نمونه-های ملات و ترکیب آن‌ها بر اساس استاندارد ASTM C305 [۲۱] انجام شد. لازم به ذکر است که ضخامت درزهای افقی و قائم ملات در ساخت تمامی نمونه‌های آجرکار ثابت و به مقدار ۱۰ تا ۱۲ میلی‌متر است. در ساخت نمونه‌ها از آجرهای اشباع با سطح خشک مشابه پژوهش‌های قبلی [۸] به دلیل جلوگیری از جذب آب ملات تازه استفاده گردید و به این منظور آجرها ۲۴ ساعت قبل از استفاده در آب قرار داده شدند. در ساخت نمونه‌های آجری به‌منظور ثابت نگه‌داشتن روانی ملات، آب به مقدار لازم به ملات اضافه می‌شد تا روانی ۵±۱۱۰ درصد در حین ساختن واحدهای بنایی حفظ شود. همچنین منشورهای آجری ساخته‌شده به‌منظور عمل‌آوری ۲۸ روز و تا پیش از انجام آزمایش تحت مراقبت رطوبتی در زیر گونی و پلاستیک قرار گرفتند.

در هنگام ساخت نمونه‌های آجری با آجر سوراخ‌دار حفرات موجود به‌صورت نسبی با ملات پر شد. در ساخت نمونه‌ها با آجر سوراخ‌دار سعی بر آن شد که حجم سوراخ‌ها با ملات پر شوند و از طرفی به صورتی نباشد که با واقعیت اجرایی آن‌ها در سازه‌ها متفاوت باشند. بااین‌حال، حدود ۷۰ درصد حجم سوراخ‌ها در هنگام ساخت نمونه‌ها با ملات پر شد. با احتساب پر شدن ۷۰ درصد از حجم حفرات در هنگام ساخت نمونه‌های آجر سه‌گل و با فرض عرض یکسان (۱۰۰ میلی‌متر) برای دو نوع آجر، در ساخت یک مترمربع دیوار آجری با ضخامت نیم آجر از آجر سوراخ‌دار به مقدار ۱۳ لیتر ملات نیاز است، درصورتی‌که این مقدار برای آجرهای توپر ۱۴ لیتر ملات هست.

۲-۳- روش انجام آزمایش

- **مقاومت فشاری منشور بنایی**

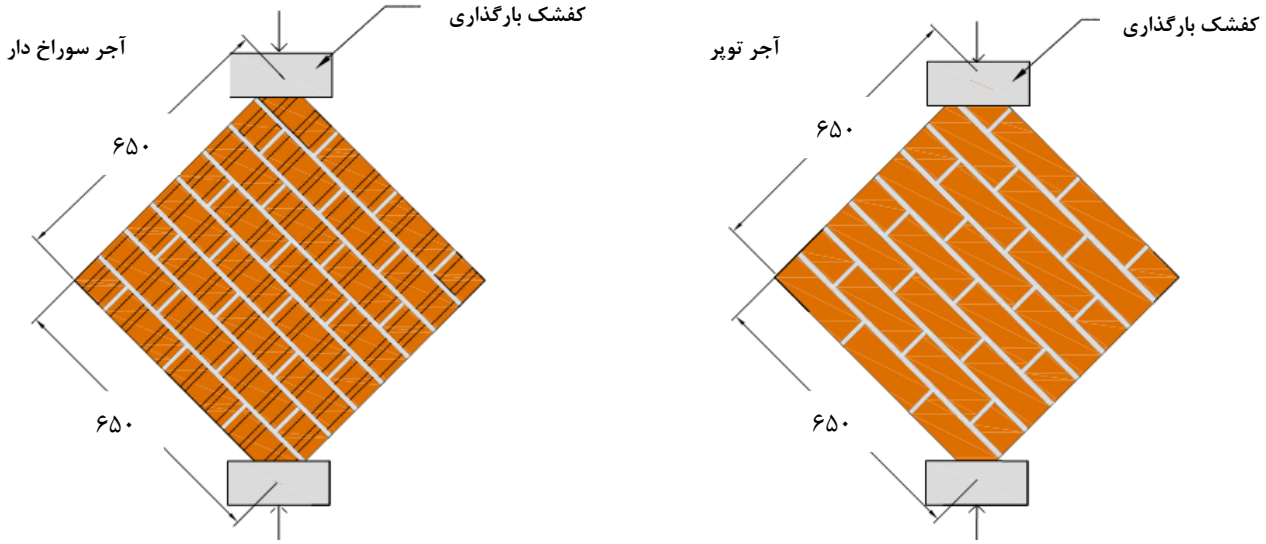
مقاومت فشاری منشورهای آجرکار، یکی از مهم‌ترین خصوصیات عملکردی سازه‌های بنایی است. ساخت و آزمایش نمونه‌های مقاومت فشاری منشور آجرکاری منطبق بر استاندارد ASTM C1314 [۲۲] است. این نمونه‌ها از چیدن چهار عدد آجر در پیوند با ۳ لایه ملات اتصال به ضخامت ۱۰ تا ۱۲ میلی‌متر بر روی‌هم به ابعاد تقریبی ۳۱۶×۲۱۰×۱۰۰ میلی‌متر برای آجرهای رسی توپر و ۳۲۴×۱۸۰×۸۴ میلی‌متر برای آجرهای سوراخ‌دار ساخته شدند (شکل ۶). بر اساس خصوصیات نمونه‌های آزمایشگاهی و استاندارد مذکور، برای هر ترکیب ملات و آجر سه نمونه مشابه و جمعاً ۱۲ عدد منشور فشاری از هر دو نوع آجر ساخته شدند که میانگین مقاومت فشاری آن‌ها گزارش گردید. بر اساس استاندارد، برای اطمینان از بارگذاری یکنواخت نمونه‌ها در سطح بالا و پایین نمونه‌ها از ورق فولادی با ضخامت مناسب استفاده شد.



شکل ۶: جزییات آزمایش فشاری منشور آجرکار

- **مقاومت کشش قطری (برشی) منشور بنایی**

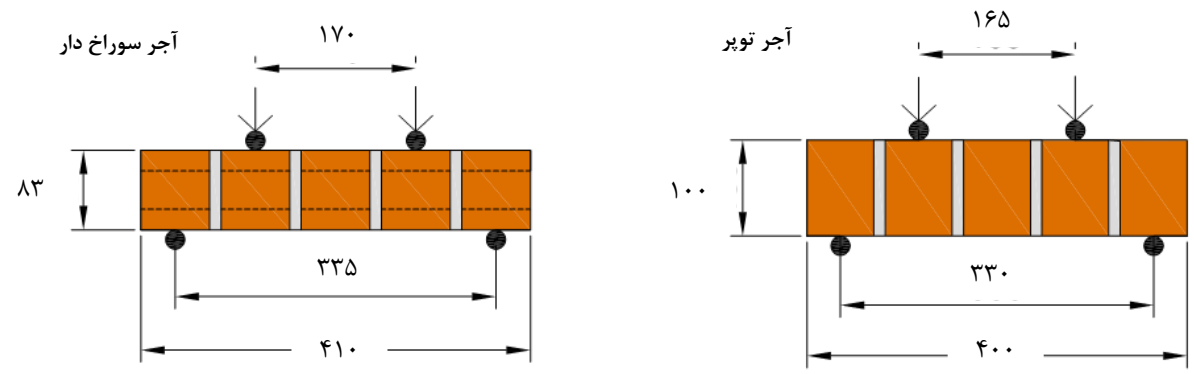
روش آزمایش و تعیین مقاومت کشش قطری (مقاومت برشی) منشورهای آجری طبق فرآیند استاندارد ASTM E519 [۲۳] انجام شد. برای این منظور، پانل‌های آجری با ابعاد ۶۵۰×۶۵۰ میلی‌متر بامهارت کار یکسان ساخته شدند. برای هر ترکیب ملات و نوع آجر تعداد ۳ نمونه مشابه ساخته شد. نمونه‌ها به‌صورت قطری توسط دو کفشک بارگذاری تا شکست نهایی نمونه به‌صورت بار افزون در بالا و پایین نمونه مانند شکل ۷ بارگذاری شدند.



شکل ۷: جزییات آزمایش کشش قطری پانل آجری

- **مقاومت چسبندگی خمشی منشور بنایی**

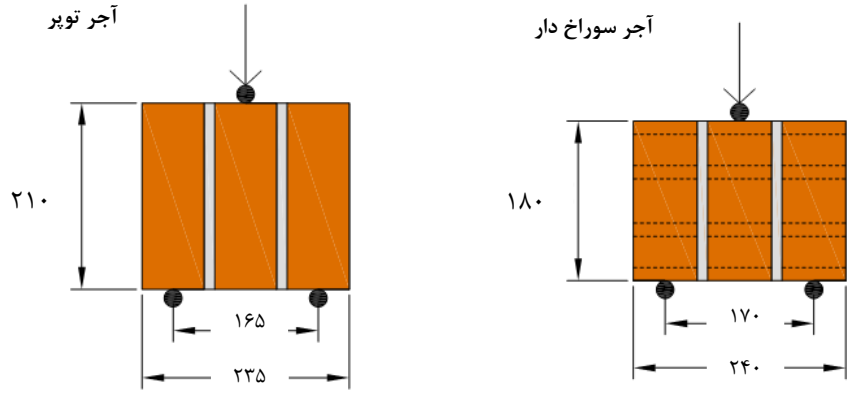
آزمایش مقاومت چسبندگی خمشی منشورهای بنایی مطابق با استاندارد ASTM E518 [۲۴] به روش بارگذاری سه‌نقطه‌ای انجام شد. برای انجام این آزمایش برای هر یک از ترکیب‌های ملات و آجر، ۵ نمونه منشوری مشابه متشکل از تعداد ۵ آجر روی‌هم با درز ملات ۱۰ تا ۱۲ میلی‌متر ساخته شدند. جزییات نمونه و بارگذاری نمونه‌های آجر توپر و سوراخ‌دار در شکل ۸ مشاهده می‌شود.



شکل ۸: جزییات آزمایش کشش خمشی منشور آجرکار

- **مقاومت چسبندگی برشی منشور بنایی**

برای تعیین مقاومت چسبندگی برشی از روش آزمون برش سه آجری واحدهای بنایی (Triplet shear test) [۲۵] همانند تحقیقات گذشته (ساتیپاران و همکاران [۷] و سینگ و مونجال [۵]) استفاده شد. در این آزمایش برای هر یک از ترکیب ملات و آجر ۳ نمونه مشابه با تعداد ۳ رج آجر روی‌هم با درز ملات ۱۰ تا ۱۲ میلی‌متری ساخته شدند. مقاومت چسبندگی برشی از تقسیم نیروی نهایی بر مجموع مساحت ۲ سطح تماس آجر و ملات به دست آمد. ابعاد نمونه‌ها و نحوه انجام آزمایش برش مستقیم در شکل ۹ ملاحظه می‌شود.



شکل ۹: جزییات آزمایش برش مستقیم منشور آجرکار

۳- نتایج و بحث

نتایج حاصل از میانگین مقاومت فشاری، مقاومت برشی، مقاومت چسبندگی خمشی و مقاومت چسبندگی برشی منشورها و پانل-های بنایی ساخته‌شده از دو نوع آجر با دو نوع ملات ضعیف و قوی ارائه و بررسی می‌شود.

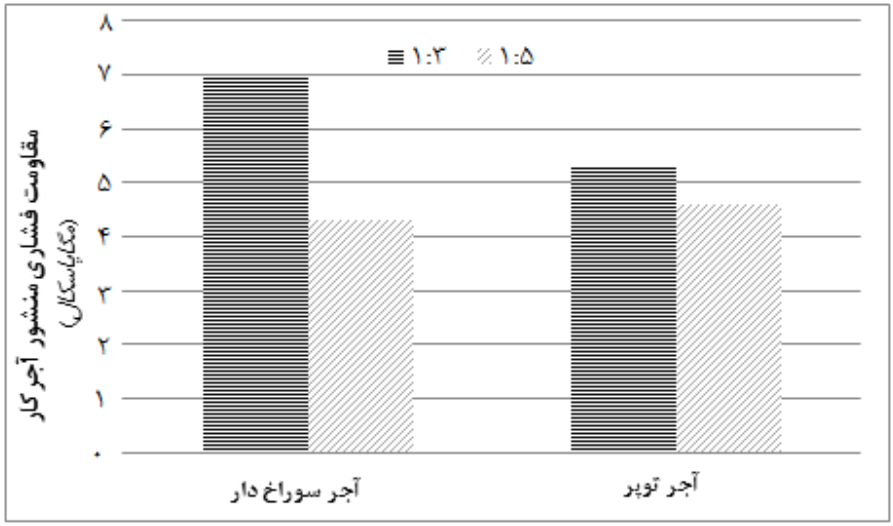
۳-۱- مقاومت فشاری منشور آجرکار

میانگین نتایج حاصل از آزمون مقاومت فشاری منشور بنایی در جدول ۳ و شکل ۱۰ ارائه‌شده است. در محاسبه مقاومت فشاری آجر سوراخ‌دار، طبق استاندارد ASTM C1314 مجموع مساحت سوراخ‌ها نزدیک به ۲۵ درصد سطح کل آجر است و از سوی دیگر سوراخ‌ها عمدتاً با ملات پر می‌شوند؛ بر این اساس مقاومت فشاری برحسب مساحت کل سطح مقطع آجر محاسبه شد. با توجه به این نتایج، می‌توان دریافت صرف‌نظر از نوع آجر با افزایش مقاومت فشاری ملات، مقاومت فشاری منشور آجرکار نیز افزایش می‌یابد که این نتیجه در پژوهش‌های قبلی نیز اشاره‌شده است [۹ و ۱۱]. همچنین با مقایسه مقاومت فشاری نمونه‌های آجری می‌توان دریافت که با کاهش حدود ۵۲ درصدی مقاومت فشاری ملات از قوی به ضعیف، مقاومت فشاری منشور آجرکار با آجر سوراخ‌دار کاهش مقاومت بیشتری نسبت به منشورهای آجرکار با آجر توپر داشته است. با تغییر ملات قوی به ضعیف مقاومت فشاری منشورهای آجری با آجر توپر ۱۳ درصد کاهش مقاومت داشته است درصورتی‌که کاهش همین مشخصه در آجرهای سوراخ‌دار به میزان ۳۹ درصد است. درنتیجه مقاومت فشاری آجرهای سوراخ‌دار حساسیت بیشتری به نوع و مقاومت فشاری ملات دارد (شکل ۱۰).

جدول ۳: نتایج مقاومت فشاری منشورهای آجرکار

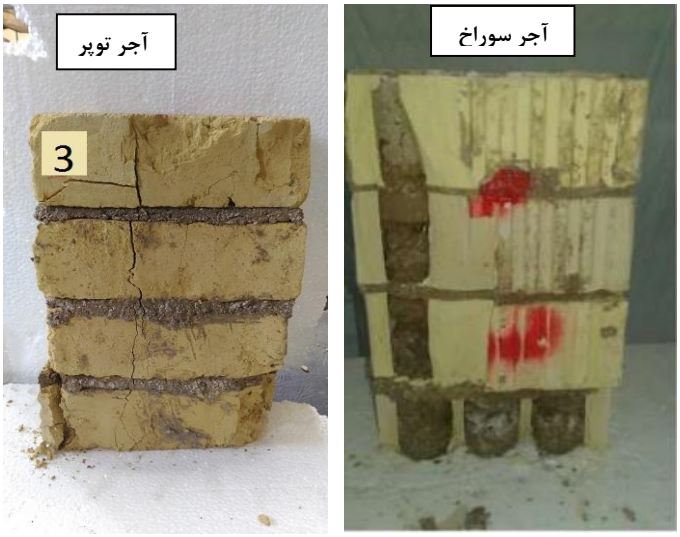
مقاومت فشاری منشور آجری (*MPa*)				مقاومت فشاری ملات (*MPa*)		نوع ملات	
آجر سوراخ‌دار		آجر توپر					
۷/۰	٪ -۳۹*	۵/۳	٪ -۱۳*	۱۱/۱	٪ -۵۲*	۱:۳	(ماسه : سیمان)
۴/۳		۴/۶		۵/۳		۱:۵	

* درصد کاهش مقاومت با تغییر ملات از قوی به ضعیف



شکل ۱۰: مقایسه مقاومت فشاری منشور آجرکار

با توجه به جدول ۲، مقاومت فشاری آجر سوراخ‌دار (۲۰/۴ مگاپاسکال) از مقاومت فشاری آجر توپر (۱۳/۳ مگاپاسکال) حدود ۵۳ درصد بیشتر است؛ لیکن مقاومت فشاری منشور آجرکار با آجر توپر در ملات ضعیف از مقاومت فشاری منشور آجرکار با آجر سوراخ‌دار بیشتر است. این امر می‌تواند به دلیل اختلاف زیاد بین مقاومت فشاری ملات و آجر و اختلال در رفتار اندرکنشی بین ملات و آجر باشد. این موضوع در شکل ۱۱ که نوع شکست منشورهای آجرکار را نمایش می‌دهد مشهود است. درنتیجه اختلاف بالای مقاومتی بین آجر و ملات می‌تواند منجر به نتیجه منفی و عملکرد نامطلوب منشور آجرکار شود. در نمونه آجر سوراخ‌دار به دلیل ضعف شدید ملات نسبت به آجر، ترک‌ها و گسیختگی‌های پوسته‌ای در محدوده مرزی آجر گسترش‌یافته و آجر زودتر از ملات دچار خرابی ترد شکن شد. در پژوهش‌های گذشته نیز چنین نوع ترک و شکستی در آجرهای سوراخ‌دار مشاهده شد [۶].



شکل ۱۱: مقایسه نوع شکست فشاری منشور آجرکار با ملات ضعیف

در آیین‌نامه‌های مختلف [۲۶ و ۲۷]، مقاومت فشاری منشور آجرکار را با مقاومت فشاری واحد آجری مقایسه می‌کنند که این نسبت برای دو نوع آجر این تحقیق در جدول ۴ خلاصه‌شده است. با مشاهده این جدول می‌توان دریافت که هرچه مقاومت فشاری ملات بیشتر باشد، نسبت مقاومت فشاری منشور آجرکار خالص به مقاومت فشاری آجر افزایش می‌یابد. به‌عبارتی‌دیگر، اثر مقاومت فشاری ملات نسبت به مقاومت فشاری آجر تأثیر بیشتری در افزایش مقاومت فشاری منشور آجرکار دارد. اگر آجر ضعیف باشد و ملات قوی این نسبت بیشتر از حالتی است که ملات ضعیف و آجر قوی باشد.

جدول ۴: نسبت مقاومت فشاری منشور آجرکار به مقاومت فشاری خالص آجر

نوع ملات		نسبت مقاومت فشاری منشور آجرکار به مقاومت فشاری آجر	
		آجر توپر	آجر سوراخ‌دار
(ماسه : سیمان)	۱:۳	۰/۴۰	۰/۳۴
	۱:۵	۰/۳۴	۰/۲۱

۳-۲- مقاومت برشی پانل آجرکار

آزمایش مقاومت کشش قطری (برشی) پانل‌های ۶۵۰×۶۵۰ میلی‌متری با دو نوع آجر توپر و سوراخ‌دار آجرکار به‌صورت بار افزون و تا تخریب کامل نمونه انجام شد. نتایج حاصل از انجام این آزمایش به دودسته نتایج عددی شامل تنش برشی نهایی و همچنین ارزیابی کیفی نوع شکست تقسیم می‌شوند. عیار ملات، مقاومت فشاری ملات و تنش برشی متوسط پانل آجری حاصل در جدول ۵ ارائه‌شده است.

جدول ۵: نتایج مقاومت کشش قطری پانل‌های آجرکار

نوع ملات		مقاومت فشاری ملات (*MPa*)		مقاومت برش قطری پانل آجری (*MPa*)			
				آجر توپر		آجر سوراخ‌دار	
(ماسه : سیمان)	۱:۳	۱۱/۱	٪ -۵۲*	۰/۶۶	٪ -۲۶*	۰/۸۴	٪ -۳۷*
	۱:۵	۵/۳		۰/۴۹		۰/۵۳	

* درصد کاهش مقاومت با تغییر ملات از قوی به ضعیف

بر اساس نتایج جدول ۵، با افزایش مقاومت فشاری ملات، مقاومت برشی پانل‌های آجرکار نیز افزایش می‌یابد و هر چه مقاومت فشاری واحد آجری بیشتر باشد، مقاومت برشی ناشی از آزمایش کشش قطری نیز افزایش یابد. علاوه بر این، از دلایل دیگر افزایش مقاومت کشش قطری پانل‌های آجری با آجر سوراخ‌دار می‌توان به پر بودن سوراخ‌های آجر از ملات و درگیری مکانیکی و قفل شوندگی بیشتر لایه‌های اتصال ملات در پانل‌های برشی اشاره کرد.

با مقایسه نتایج جدول ۵ و شکل ۱۲ می‌توان فهمید که حساسیت مقاومت برشی پانل‌های آجری با تغییر مقاومت فشاری ملات ناشی از تغییر عیار در پانل‌های آجر سوراخ‌دار بیشتر از پانل‌های با آجر توپر است. به‌عنوان‌مثال، با تغییر مقدار مقاومت فشاری ملات ۱:۳ به ملات ۱:۵ مقاومت برشی منشورهای آجری با آجر توپر ۲۶ درصد کاهش مقاومت دارد درصورتی‌که کاهش همین کمیت در آجرهای سوراخ‌دار به میزان ۳۷ درصد است.

شکل ۱۲: مقایسه مقاومت برشی پانل آجرکار

انواع شکست‌های مشاهده‌شده در این آزمایش به دو صورت ناگهانی یا ترد و تدریجی یا نیمه ترد بود. در شکست ترد، نمونه‌ها پس از انجام بارگذاری و رسیدن به نقطه شکست به‌طور ناگهانی تخریب و یا به دو یا چند قسمت تقسیم می‌شوند؛ اما در شکست تدریجی، نمونه‌ها پس از انجام بارگذاری و رسیدن به نقطه شکست، نمونه به‌آرامی ترک خورد و ترک در قطر نمونه به‌صورت عمودی در چند مرحله ایجاد شد.

طبق مشاهده فرآیند شکست نمونه‌ها در حین آزمایش، شکست نمونه‌های آجر توپر با عیار ۱:۳ و همچنین نمونه‌های ساخته‌شده با هر دو عیار ۱:۳ و ۱:۵ و آجر سوراخ‌دار عموماً از نوع تدریجی بودند، به‌گونه‌ای که ابتدا ترک در تعدادی از آجر عبور کرد و سپس با افزایش

بارگذاری، نمونه‌ها در امتداد قطر قایم (راستای اعمال بار در پانل مربعی شکل) خود شکسته شدند. شکست پانل آجری ساخته‌شده با آجر توپر با عیار ۱:۵ ترد و قطری بود. شکست این نمونه‌ها به‌گونه‌ای ناگهانی بود که پس از شکست قطعات سریعاً فروریختند. در پانل‌های ساخته‌شده از آجر گری، شکست پله‌ای شکل بود و از درز ملات افقی و قایم در امتداد قطر قایم پانل (راستای اعمال بار) عبور می‌کرد (شکل ۱۳). در پانل‌های آجر سوراخ‌دار، محل شکست خطی قایم و تقریباً مستقیم بود که از بین آجر و ملات می‌گذشت (شکل ۱۴).

شکل ۱۳: شکست قطری پانل‌های آجر توپر

شکل ۱۴: شکست قطری پانل‌های آجر سوراخ‌دار

۳-۳- چسبندگی خمشی منشورهای آجرکار

آزمایش مقاومت کشش خمشی اتصال آجر و ملات روی منشور آجری متشکل از ۵ آجر در ترکیب با ۴ لایه ملات به‌صورت بار افزون و تا شکست کامل نمونه انجام شد. نتایج حاصل به دودسته نتایج عددی شامل مقاومت چسبندگی خمشی نهایی و همچنین ارزیابی کیفی نوع شکست تقسیم می‌شوند. نتایج حاصل از انجام این آزمایش در جدول ۶ و شکل ۱۵ ارائه‌شده است.

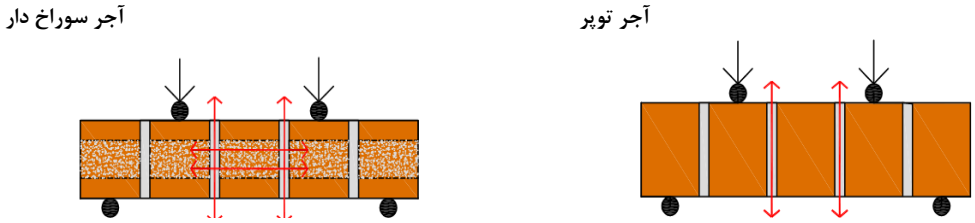
جدول ۶: نتایج مقاومت چسبندگی خمشی اتصال آجر و ملات در منشورهای آجرکار

نوع ملات		مقاومت چسبندگی خمشی منشور آجری (*MPa*)			
		آجر توپر		آجر سوراخ‌دار	
(ماسه : سیمان)	۱:۳	۰/۷۸	٪ -۲۷*	۱/۳	٪ -۲۹*
	۱:۵	۰/۵۷		۰/۹۲	

* درصد کاهش مقاومت با تغییر ملات از قوی به ضعیف

شکل ۱۵: مقایسه مقاومت چسبندگی خمشی منشور آجرکار

همان‌طور که مشاهده می‌شود افزایش عیار سیمان، منجر به افزایش میزان چسبندگی خمشی بین ملات و آجر شد. با مقایسه بین مقاومت کشش خمشی اتصال در عیارهای ۱:۳ و ۱:۵ با توجه به نوع آجر می‌توان مشاهده کرد که منشورهای آجری با آجر سوراخ‌دار مقاومت کشش خمشی بیشتری در مقایسه با منشورهای ساخته‌شده از آجر توپر از خود نشان دادند. این امر می‌تواند به دلیل پر شدن نسبی حفره‌های آجرهای سوراخ‌دار از ملات در حین ساخت و ایجاد درگیری فیزیکی با تشکیل قفل و بست بین ملات و آجر باشد. درصورتی‌که در آجرهای توپر اتصال بین ملات و آجر فقط از طریق سطح مشترک آجر و ملات ایجاد می‌شود. این دو سازوکار در شکل ۱۶ مشاهده می‌شود.



شکل ۱۶: سازوکار اتصال آجر و ملات در آزمون کشش خمشی

با مقایسه مقاومت چسبندگی خمشی اتصال در جدول ۶، با تغییر عیار ملات از ۱:۳ به ۱:۵ در هر دو نوع آجر مقاومت خمشی، کاهش مقاومت مشابه به هم داشتند (۲۹ درصد برای آجر سوراخ‌دار و ۲۷ درصد برای آجرهای توپر) که این موضوع نشان می‌دهد که

مقاومت کشش خمشی اتصال وابستگی بیشتری به نوع آجر و درگیری بین لایه‌های اتصال در مقایسه با نوع ملات دارند. شکل ۱۷ نحوه انجام آزمایش و نوع شکست نمونه‌های کشش خمشی را نشان می‌دهد. شکست همه نمونه‌های ساخته‌شده از نوع شکست بین صفحه ملات و آجر بود. در پژوهش‌های قبلی نیز اشاره‌شده است که شکست نمونه‌های کشش خمشی تنها بستگی به چسبندگی سطحی بین ملات و آجر دارد [۶ و ۹] که در این پژوهش نیز مشاهده شد.

شکل ۱۷: جزییات آزمایش و شکست اتصال آجر و ملات نمونه‌های منشور آجرکار در آزمون کشش خمشی

۳-۴- چسبندگی برشی منشورهای آجرکار

نتایج متوسط آزمون برش مستقیم در جدول ۷ و شکل ۱۸ ارائه‌شده است.

جدول ۷: نتایج مقاومت چسبندگی برشی اتصال آجر و ملات در منشورهای آجرکار

نوع ملات		مقاومت چسبندگی برشی منشور آجری (*MPa*)			
		آجر توپر		آجر سوراخ‌دار	
(ماسه : سیمان)	۱:۳	۰/۲۸	٪ -۱۱*	۰/۲۷	٪ -۲۲*
	۱:۵	۰/۲۵		۰/۲۱	

* درصد کاهش مقاومت با تغییر ملات از قوی به ضعیف

شکل ۱۸: مقایسه مقاومت چسبندگی برشی منشور آجرکار

مانند مقاومت کشش خمشی اتصال، مقاومت چسبندگی برشی اتصال نیز با افزایش مقاومت ملات، افزایش می‌یابد. این افزایش مقاومت در آجرهای توپر نسبت به آجرهای سوراخ‌دار چندان محسوس نیست که نشانگر این است مقاومت برشی اتصال آجر گری و ملات تا حد زیادی بستگی به زبری سطح آجر دارد. نتایج نشان می‌دهد افزایش مقاومت چسبندگی برشی با تغییر ملات از ۱:۵ به ۱:۳ در منشورهای با آجر توپر ۱۰ درصد و این مقدار در منشورهای با آجر سوراخ‌دار ۲۲ درصد است.

همچنین با مقایسه مقاومت برشی اتصال نمونه‌های آجر تو پر و سوراخ‌دار در عیارهای ملات مشابه می‌توان به این نتیجه رسید که با وجود درگیری بین لایه‌های اتصال در نمونه‌های با آجر سوراخ‌دار که انتظار می‌رفت مقاومت این نمونه‌ها تفاوت زیادی با نمونه‌های آجر توپر داشته باشند ولی به دلیل سطح زبر آجرهای توپر در مقایسه با سطح صیقلی آجرهای سوراخ‌دار و چسبندگی بیشتر لایه‌های ملات به سطح آجر، مقاومت چسبندگی برشی اتصال در نمونه‌های آجر توپر بیشتر از آجر سوراخ‌دار بود. مقایسه نوع شکست نمونه‌های آجری در شکل ۱۹ این نتیجه را به‌خوبی اثبات می‌کند.

شکل ۱۹: شکست اتصال آجر و ملات نمونه‌های منشور آجرکار در آزمون چسبندگی برشی

نمونه‌های با آجر توپر به دلیل زبر بودن سطح خارجی آجر و بیشتر بودن سطح تماس بین آجر و ملات چسبندگی برشی متفاوتی نسبت به منشورهای با آجر سوراخ‌دار با سطح نسبتاً صاف دارد. این سطح تماس متفاوت در نمونه‌های با آجر توپر، باعث شکست برشی در

خود ملات شد، درصورتی‌که در تمام نمونه‌های با آجر سوراخ‌دار هیچ شکستی در ملات مشاهده نشد و ملات و آجر از روی صفحه تماس خود دچار جداشدگی شد. موضوع سطح تماس بین آجر و ملات و ارتباط آن با نوع شکست نمونه‌های برش مستقیم مشابه با نتایج در پژوهش‌های قبلی [۹ و ۱۱] است. با توجه به موضوعات عنوان‌شده می‌توان نتیجه گرفت مقاومت چسبندگی برشی بین ملات و آجر حساسیت بیشتری به سطح تماس در مقایسه با نوع آجر در ملات دارد.

۴- جمع‌بندی

در این پژوهش آزمایشگاهی، تأثیر عیار سیمان در ملات و نوع آجر بر مشخصات مکانیکی منشورهای آجرکار شامل مقاومت فشاری، مقاومت برشی، چسبندگی کشش خمشی و مقاومت چسبندگی برشی ملات مورد ارزیابی قرار گرفت. برای این منظور، از دو نوع آجر رسی پخته توپر (گری) و سوراخ‌دار (سه‌گل) و دو نوع ملات ماسه سیمانی قوی و ضعیف استفاده شد. با مقایسه و بررسی نتایج حاصل می‌توان به نکات زیردست یافت:

۱- مقاومت فشاری منشورهای آجرکار با افزایش مقاومت فشاری ملات افزایش می‌یابد. آجرهای سوراخ‌دار حساسیت بیشتری به نوع و مقاومت فشاری ملات از خود نشان دادند و اثر مقاومت فشاری ملات نسبت به مقاومت فشاری آجر تأثیر بیشتری بر مقاومت فشاری منشور آجرکار دارد.

۲- با افزایش مقاومت فشاری ملات و واحدهای آجری، مقاومت کشش قطری پانل‌های آجری افزایش می‌یابد و همچنین افزایش مقاومت فشاری ملات تأثیر بیشتری بر افزایش مقاومت کشش قطری نمونه‌های با آجر توپر نسبت به نمونه‌های با آجر سوراخ-دار دارد.

۳- شکست نمونه‌های قطری با آجرهای سوراخ‌دار و در نمونه‌های با آجر توپر با ملات قوی از نوع تدریجی و نیمه ترد بودند.

۴- مقاومت چسبندگی خمشی اتصال با افزایش عیار سیمان و افزایش درگیری فیزیکی در آجر سوراخ‌دار، افزایش می‌یابد و مقاومت خمشی اتصال وابستگی بیشتری به نوع آجر در مقایسه با نوع ملات دارد.

۵- با افزایش مقدار سیمان در ملات، مقاومت چسبندگی برشی اتصال منشورهای آجرکار افزایش می‌یابد. مقدار مقاومت چسبندگی برشی اتصال ارتباط مستقیم و تأثیرگذاری با زبری سطح تماس بین آجر و ملات دارد.

۶- بیشترین میزان افزایش مقاومت با تغییر نوع آجر در عیارهای یکسان را چسبندگی خمشی اتصال با میانگین درصد افزایش ۶۷ درصد دارد. این بدان معنی است که با تغییر نوع آجر از توپر به سوراخ‌دار بیشترین تأثیر در مقاومت چسبندگی خمشی در رفتار خارج از صفحه حاصل شد.

۷- درمجموع می‌توان استفاده از آجر سوراخ‌دار در مقایسه با آجر توپر را در صورت استفاده از ملات قوی در دیوار بنایی توصیه نمود. دیوار با آجر سوراخ‌دار و ملات قوی در مقایسه با آجر توپر به افزایش ۳۲ درصدی مقاومت فشاری، ۲۷ درصدی مقاومت برشی و ۶۷ درصدی چسبندگی خمشی و به کاهش ۴ درصدی چسبندگی برشی می‌شود.

۸- در صورت استفاده از آجر سوراخ‌دار، با وجود این‌که مشخصات ظاهری و مقاومتی در مقایسه با آجر توپر بهتر است، نباید از ملات ضعیف استفاده کرد زیرا افت مشهودی در مقاومت فشاری و چسبندگی برشی رخ می‌دهد.

۹- مشخصات مکانیکی حاصل از آزمون‌های استاندارد روی منشورهای بنایی برای ارزیابی عملکرد و مدل‌سازی رفتار دیوارهای بنایی با مصالح مشابه تحت بارهای ثقلی و جانبی قابل‌استفاده است.

مراجع

[1] Kaushik, H. B., Rai, D. C., & Jain, S. K. (2007). Stress-strain characteristics of clay brick masonry under uniaxial compression. *Journal of materials in Civil Engineering*, 19(9), 728-739.

[2] Gumaste, K. S., Rao, K. N., Reddy, B. V., & Jagadish, K. S. (2007). Strength and elasticity of brick masonry prisms and wallettes under compression. *Materials and structures*, *40*(2), 241-253.

[3] Wu, F., Li, G., Li, H. N., & Jia, J. Q. (2013). Strength and stress–strain characteristics of traditional adobe block and masonry. *Materials and structures*, *46*(9), 1449-1457.

[4] Mohamad, G., Lourenço, P. B., Roman, H. R., Barbosa, C. D. S., & Rizzatti, E. (2012). Stress-strain behavior of concrete block masonry prisms under compression. *15th International brick and block masonry conference*. Florianopolis, Brazil, 1-8.

[5] Singh, S. B., & Munjal, P. (2017). Bond strength and compressive stress-strain characteristics of brick masonry. *Journal of Building Engineering*, *9*, 10-16.

[6] Sarangapani, G., Venkatarama Reddy, B. V., & Jagadish, K. S. (2005). Brick-mortar bond and masonry compressive strength. *Journal of materials in civil engineering*, *17*(2), 229-237.

[7] Sathiparan, N., Anusari, M. K. N., & Samindika, N. N. (2014). Effect of void area on hollow cement masonry mechanical performance. *Arabian Journal for Science and Engineering*, *39*(11), 7569-7576.

[8] Thamboo, J. A., Dhanasekar, M., & Yan, C. (2013). Flexural and shear bond characteristics of thin layer polymer cement mortared concrete masonry. *Construction and Building Materials*, *46*, 104-113.

[9] Thamboo, J. A., & Dhanasekar, M. (2015). Characterisation of thin layer polymer cement mortared concrete masonry bond. *Construction and Building Materials*, *82*, 71-80.

[10] 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.

[11] 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.

[12] Thamboo, J. A. (2020). Material characterisation of thin layer mortared clay masonry. *Construction and Building Materials*, *230*, 116932.

[13] Jiao, Z., Wang, Y., Zheng, W., Huang, W., & Zhao, Y. (2019). Bond properties of alkali-activated slag concrete hollow block masonry with different mortar strength grades. *Construction and Building Materials*, *216*, 149-165.

[14] Endo, Y., Yamaguchi, K., Hanazato, T., & Mishra, C. (2020). Characterisation of mechanical behaviour of masonry composed of fired bricks and earthen mortar. *Engineering Failure Analysis*, *109*, 104280.

[15] ASTM C150-16. (2016). Standard Specification for Portland Cement. Annual book of ASTM standards. West Conshohocken, PA, USA: American Society of Testing Materials.

[16] ASTM C144-11. (2011). Standard Specification for Aggregate for Masonry Mortar. Annual book of ASTM standards. West Conshohocken, PA, USA: American Society of Testing Materials.

[17] 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.

[18] ASTM C1437-07. (2007). Standard Test Method for Flow of Hydraulic Cement Mortar. Annual book of ASTM standards. West Conshohocken, PA, USA: American Society of Testing Materials.

[19] ASTM C469-14. (2014). Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression. Annual book of ASTM standards. West Conshohocken, PA, USA: American Society of Testing Materials.

[20] ASTM C67-10. (2010). Standard Test Methods for Sampling and Testing Brick and Structural Clay Tile. Annual book of ASTM standards. West Conshohocken, PA, USA: American Society of Testing Materials.

[21] ASTM C305-10. (2010). Standard Practice for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency. Annual book of ASTM standards. West Conshohocken, PA, USA: American Society of Testing Materials.

[22] ASTM C1314-10. (2010). Standard Test Method for Compressive Strength of Masonry Prisms. Annual book of ASTM standards. West Conshohocken, PA, USA: American Society of Testing Materials.

[23] ASTM E519-12. (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.

[24] ASTM E518-03. (2003). Standard Test Methods for Flexural Bond Strength of Masonry. Annual book of ASTM standards. West Conshohocken, PA, USA: American Society of Testing Materials.
[25] De Vekey, R. C. (1996). Determination of shear strength index for masonry unit/mortar junction. *Matériaux et constructions*, 29(192), 459-463.
[26] ACI 530-02/ASCE 5-02/TMS 402-02, Building code requirements for masonry structures, Masonry standards joint committee (MSJC), American concrete institute, The masonry society, Detroit, USA, 2002.
[27] IS 2250-1995. Indian standard code of practice for preparation and use of masonry mortars, 5th Rev., Bureau of Indian standards, New Delhi, India, 1995.