



# بررسی آزمایشگاهی دیوار خشتی تحت کشش قطری با رویکرد تقویت خشت و ملات

اصغر وطنی اسکویی\*، محمد افضلی\*\*، محمدرضا مددی پور\*\*\*، علی بخشی\*\*\*\*

تاریخ دریافت مقاله:

۱۳۹۳/۰۷/۱۳

تاریخ پذیرش مقاله:

۱۳۹۴/۰۶/۲۸

## چکیده

در این مطالعه نحوه بهبود عملکرد لرزه‌ای دیوارهای خشتی جدید مورد بررسی قرار گرفته است. بهبود عملکرد با دو دیدگاه بهبود مشخصات بلوک و ملات، انجام شده است. بدین منظور ابتدا بلوک‌های خشت با افزودنی‌های طبیعی (لیف خرما، پوسته برنج، خرده چوب و کاه) با درصدهای وزنی مختلف ۰/۳، ۰/۶ و ۰/۹ تقویت شده‌اند. در انتخاب افزودنی‌ها سعی شده است از افزودنی‌های طبیعی، ارزان و موجود در اکثر نقاط جهان استفاده شود. بهترین نمونه تقویت شده، با توجه به بهترین مقاومت فشاری و دوام در برابر آب‌شستگی انتخاب شده است. سپس بلوک‌هایی با توجه به نتایج بلوک‌های دارای افزودنی‌های طبیعی ساخته شده و مشخصات مکانیکی آن‌ها به کمک آزمایش‌های انجام شده بر روی آن‌ها تعیین شده است. از کاه برای تقویت ملات استفاده شده و خواص مکانیکی ملات معمولی و ملات تقویت شده مورد بررسی قرار گرفته است. در پایان سه نوع دیوار (شاهد، دارای ملات مسلح شده و دارای ملات و بلوک مسلح شده) در مقیاس ۱:۲ ساخته شده‌اند. بدین منظور تعداد ۶ عدد دیوار در ابعاد ۱۲۰×۱۲۰×۲۲ سانتی‌متر ساخته شده‌اند. نمونه‌های شاهد دارای بلوک و ملات معمولی بوده و دیوارهای تقویت شده در دو نوع دارای ملات تقویت شده و نیز دارای بلوک و ملات تقویت شده بوده‌اند. سپس نمونه‌ها تحت آزمایش کشش قطری مورد آزمایش قرار گرفته و نتایج حاصل از آزمایش تحلیل شده‌اند. در دیوارهای دارای بلوک و ملات مسلح شده، مقدار نیرو به‌اندازه ۳۳/۲٪ و جذب انرژی این دیوارها به‌اندازه ۱۰۰/۸۱٪ بیشتر از دیوارهای شاهد بوده است. نتایج نشان داده‌اند که با تقویت بلوک و ملات، رفتار دیوار خشتی در برابر بار فشاری قطری بهبود یافته است. علاوه بر موارد اشاره شده وجود الیاف کاه در ملات دیوارهای تقویت شده (دیوارهای مسلح) باعث کاهش ترک و یکپارچگی بیشتر در ملات، نسبت به ملات به‌کار رفته در دیوارهای با ملات تقویت نشده (دیوار شاهد) شده است.

واژگان کلیدی: خشت، آزمایش کشش قطری، کاه، ملات، دیوار خشتی.

\* دانشیار، دانشکده عمران، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی.

\*\* دانشجوی کارشناسی ارشد سازه، دانشکده عمران، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی. Afzali.m64@gmail.com

\*\*\* دانشجوی کارشناسی ارشد سازه، دانشکده عمران، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی.

\*\*\*\* دانشیار، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی شریف.

## مقدمه

در زلزله‌هایی که در چند سال اخیر در ایران و سایر نقاط جهان رخ داده، ساختمان‌های خشتی خسارت جانی و مالی زیادی داشته است. نبودن آیین نامه و استاندارد برای ساختمان‌های خشتی از جمله موارد دیگری است که نیاز به ساخت و آزمایش دیوارهای خشتی جهت بررسی رفتار این دیوارها را دو چندان می‌کند.

ساخت و سازهای خشتی و گلی در نقاط مختلف دنیا و از جمله در کشور ما، ایران رواج بسیاری دارد. سازگاری مناسب، اقتصادی بودن و سهولت و سرعت در تهیه از جمله ویژگی‌های مثبت این نوع مصالح محسوب می‌شود که به دلیل مسائل اقتصادی، هم اکنون نیز ساخت و ساز غالب بسیاری از نقاط کشور از نوع خشتی و گلی می‌باشد. اما مسئله مهمی که در ارتباط با این ساختمان‌ها به چشم می‌خورد، عدم طراحی بسیاری از آن‌ها برای مقابله با بارهای لرزه‌ای می‌باشد. زلزله‌های اخیر نشان داده است که به طور کلی سازه‌های بنایی غیر مسلح در برابر بارهای لرزه‌ای آسیب‌پذیرند و نیاز به مقاوم‌سازی دارند [۱]. مکانیزم‌های مختلفی برای شکست دیوارهای خشتی وجود دارد. یکی از ضعف‌های دیوارهای مصالح بنایی و دیوارهای خشتی در برابر بارهای جانبی ملات آن می‌باشد.

اصلی‌ترین دلایل برای استفاده از خشت را می‌توان در موارد زیر خلاصه کرد [۲]: (الف) ماده‌ای که در همه جا در دسترس است؛ (ب) برای تولید خشت و سازه‌های خشتی، مهارت و تکنولوژی بالایی مورد نیاز نمی‌باشد؛ (پ) تعمیر و نگهداری سازه‌های خشتی، نیاز به آزمایشگاه خاصی ندارد و (ت) خواص ذاتی خاک آن را عایق صدا و گرما می‌سازد [۳ و ۴].

مقاومت جانبی یک سازه خشتی از رفتار برشی درون صفحه دیوارهای خشتی به دست می‌آید. علاوه بر این، رفتار سازه‌های خشتی به صورت برون صفحه، رفتار خمشی می‌باشد [۵ و ۶]. در مناطق با لرزه‌خیزی زیاد، فقدان سختی درون-صفحه و برون-صفحه دیوارهای خشتی، خطر بزرگی برای ساکنین می‌باشد [۷]. از آنجا که سازه‌های خشتی مقاومت و شکل‌پذیری کافی را ندارند، پایداری یک سازه خشتی معمولی و بدون تقویت بعد از یک زلزله شدید ممکن نیست [۷]. بنابراین افزایش مقاومت مناسب، یکپارچگی و اتلاف انرژی در دیوارهای خشتی، یک مسئله بحرانی تحت بارهای شدید لرزه‌ای شده است.

برای افزایش مقاومت و بهبود رفتار دیوارهای خشتی تحقیقاتی بر روی رفتار و خواص خشت شده است که روش‌های مختلفی را برای افزایش مقاومت فشاری خشت مورد استفاده قرار داده‌اند [۸ الی ۱۱]. استفاده از میلگردهای افقی و قائم در ساختار دیوارهای خشتی به وسیله بلوندت<sup>۱</sup> و همکاران مورد مطالعه قرار گرفته است، که موجب بهبود رفتار درون-صفحه و برون-صفحه دیوارهای خشتی شده است [۶].

داولینگ<sup>۲</sup> در تحقیقاتش برای بهسازی دیوار از تور در بین ملات استفاده کرده، که بیشتر در گوشه‌ها قرار داده می‌شود [۱۲].

بررسی دیوارهای خشتی را می‌توان در بخش‌های زیر در نظر گرفت: ۱- بلوکی که برای ساخت دیوار مورد استفاده قرار می‌گیرد. ۲- ملاتی که برای اتصال بلوک‌ها استفاده می‌شود. ۳- دیوار که حاصل از بلوک‌ها و ملات می‌باشد. در این تحقیق از الیاف کاه به عنوان تقویت کننده ملات و بلوک استفاده شده و پس از تعیین مشخصات مکانیکی آن‌ها، دیوار معمولی: با بلوک و ملات معمولی و دیوار تقویت شده: با بلوک و ملات تقویت شده با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

## روش آزمایش

### مصالح

برای ساخت خشت از رس، ماسه و شن استفاده شده است تا مشابه مصالح موجود در دسترس برای ساخت خشت باشد.

در خشت، سنگدانه ( شن و ماسه) نقش پر کننده و جلوگیری از انقباض و ترک خوردن خشت را دارد و آب برای روان کردن و مخلوط کردن مواد با یکدیگر مورد استفاده قرار می‌گیرد.

برای ساخت ملات نیز فقط از خاک رس و ماسه استفاده شده که مشابه مصالح رد شده از الک باشد.

برای مسلح کردن بلوک و ملات نیز از افزودنی‌های طبیعی مانند لیف خرما، کاه، خرده چوب و پوسته برنج استفاده شده است.

### خاک رس

برای تهیه خشت و ملات از یک نوع خاک رس استفاده شده است. مشخصات خاک رس با توجه به آزمایشات انجام شده در جدول شماره ۱ آورده شده است.

وزن مخصوص خاک ( $\text{kN/m}^3$ )	۲/۷
مقدار رطوبت (%)	۳/۷
حد روانی (%) Liquid Limit	۲۹
حد خمیری (%) Plastic Limit	۱۶/۹۴
حد انقباض (%) shrinkage Limit	۱۳/۵۹
نشانه خمیری (%) Plasticity index	۱۲/۰۶
نشانه روانی (%) Liquid index	-۱/۱۰
نشانه غلظت (%) Concentration index	۲/۱۰

ج ۱. مشخصات خاک رس مورد استفاده در خشت و ملات.

آزمایش‌های انجام شده بر روی خاک رس بر طبق استاندارد ASTM [۱۳] انجام شده است. بر طبق طبقه‌بندی سیستم متحد<sup>۳</sup> برای خاک، خاک از نوع رسی با خاصیت خمیری پایین (CL) می‌باشد.

## سنگدانه

سنگدانه استفاده شده در خشت، ماسه و شن می‌باشد. مشخصات ماسه و شن در جدول شماره ۲ داده شده است. با تغییرات دما رطوبت ماسه و شن نیز تغییر می‌کند، رطوبت ماسه و شن به ترتیب در هنگام استفاده در خشت برابر با ۱/۵۳ و ۲/۴ درصد بوده است.

نوع سنگدانه	$W_d$ (gr)	$W_{SSD}$ (gr)	$V_s$ (c.c)	$G_s$	$W_{SSD}$ %
ماسه	۴۹۳/۶۶	۵۱۱/۷۲۸	۲۷۰	۱/۸۳	۳/۶۶
شن	۴۹۴/۴۴	۵۰۵/۴۲	۲۰۰	۲/۴۷	۲/۲۲

ج ۲. مشخصات سنگدانه.

### افزودنی‌های طبیعی

کاه: این افزودنی چون ساقه گیاه بوده، دارای ساختاری توخالی و سطح زبر است. طول میانگین قطعات آن ۲/۵ سانتی‌متر بوده که در بازه ۱ تا ۴ سانتی‌متر متغیر بوده است.



ت ۱. افزودنی کاه.

تنش کششی (MPa)	وزن مخصوص ( $\text{kN/m}^3$ )	تراکم	طول (mm)	قطر (mm)
۳۸-۵۰	۱۲	۲/۰۵	۱۰-۴۰	۱-۴

ج ۳. مشخصات افزودنی کاه.

لیف خرما: این افزودنی حاصل پوسته درخت خرما بوده که چون طول آن بیش از ده برابر قطر آن بوده به آن لیف

خرما گفته‌اند. لیف خرما دارای ساختاری توپر است. برای خرد کردن لیف خرما ابتدا آنرا در آب خیس داده، سپس تار و پود آنرا جدا کرده و پس از طولی شدن کامل الیاف آن، خرد شده است.



ت ۲. الیاف خرما.

تنش کششی (MPa)	کرنش نهایی %	E (MPa)	ضریب بواسون	طول (mm)	قطر (mm)
۶۵/۱	۰/۰۳۷	۴۲۰۰	۰/۴۹	۱۰-۴۰	۱-۲

ج ۴. مشخصات الیاف خرما.

خرده چوب: این افزودنی حاصل پرت مواد کارگاه چوب‌بری بوده، ساختار آن به چوب پایه بستگی دارد در این پژوهش خرده چوب استفاده شده، فنری شکل و طول میانگین قطعات آن یک سانتی‌متر بوده است.



ت ۳. خرده چوب.

پوسته برنج: این افزودنی حاصل از ضایعات جدا شده از برنج بوده که تقریباً پودر مانند است.

تذکر: چون افزودنی‌های طبیعی که برای تقویت استفاده شده‌اند، همانطور که قبلاً گفته شد به‌خاطر الیافی بودن یا توخالی و توپر بودن انتخاب شده‌اند، از خاکستر استفاده نشده است.



ت ۴. پوسته برنج.

نمونه	پوسته برنج	خرده چوب	لیف خرما	کاه
جذب آب %	۴۱۰	۲۸۶	۲۳۲	۳۴۸

ج ۵. جذب آب افزودنی‌های طبیعی.

### روش آماده‌سازی نمونه‌ها

#### آماده‌سازی بلوک‌های خشتی با افزودنی‌های طبیعی

هدف از این مطالعه بررسی تأثیر افزودنی‌های طبیعی بر روی خواص مکانیکی خشت می‌باشد. برای این هدف درصد خاک رس، ماسه، شن و آب ثابت و درصد الیاف متغییر در نظر گرفته شده است.

درصد مصالح استفاده شده در این آزمایش در جدول شماره ۶ آمده است. درصدهای داده شده در این جدول بر حسب وزن خاک محاسبه شده است. در جدول شماره ۶ برای انواع مخلوط‌ها از علائم اختصاری استفاده شده است که C نشان‌دهنده خاک رس، S ماسه، G شن، N افزودنی طبیعی که باید با W خرده چوب نجاری، P الیاف خرما، R پوسته برنج و St کاه در جدول شماره ۶ جایگزین شود به‌عنوان مثال A0.3W یعنی نمونه‌ای

### آماده‌سازی بلوک‌های خشتی برای ساخت دیوار

بلوک‌هایی که برای ساخت دیوار شاهد و دیوار تقویت شده در نظر گرفته شده‌اند از آنجا که باید در تعداد زیادی ساخته می‌شدند مقدار آب و رس در آن‌ها بیشتر شده تا کارایی بهتر و سرعت بیشتری در ساخت داشته باشند.

از طرفی تقویت‌کننده با توجه به آزمایش‌های انجام شده بر روی بلوک‌های دارای افزودنی طبیعی انجام شده است که از لیف خرما و کاه به ترتیب تأثیر مثبتی بر مقاومت فشاری و دوام در برابر آب شستگی داشتند، انتخاب شده‌اند.

بلوک‌هایی که برای دیوار شاهد انتخاب شده‌اند نیز بدون تقویت‌کننده بوده‌اند.

بر اساس نوع مصرف این خشت، ترکیباتی انتخاب شده‌اند که در جدول شماره ۸ درصد‌های وزنی آن‌ها ذکر شده است:

نمونه	لیف خرما %	کاه %	آب %	شن %	ماسه %	رس %
تقویت شده	۰/۸	۰/۸	۱۲/۷۹	۵/۹	۴۷/۲۳	۳۱/۴۹
معمولی	۰	۰	۱۳	۶	۴۸	۳۲

### ج ۸. درصد‌های ترکیب ثابت برای ساخت نمونه خشت برای ساخت انواع دیوار.

دانه‌بندی مصالح مورد استفاده در خشت در نمودار شماره ۱ نمایش داده شده است. مصالح براساس ASTM D422-87 خوب دانه‌بندی شده، بوده است.

ابعاد خشت مورد استفاده برای ساخت دیوار خشتی، ۲۲ در ۲۲ در ۷ سانتی‌متر به‌عنوان خشت و ۲۲ در ۱۱ در ۷ به‌عنوان نیم خشت (برای این که رج روی رج قرار نگیرد)، بوده است.

با خرده چوب که ۰/۳ خرده چوب در نمونه به‌کار رفته است.

افزودنی طبیعی	آب %	شن %	ماسه %	خاک رس %	نام نمونه
-	۰/۳۶	-	-	۱	C
-	۰/۱۴	۰/۱۳	۰/۷۵	۰/۳۵	A=CSG
۰/۰۰۴	۰/۱۴	۰/۲۵	۰/۷۵	۰/۲۲	A0.3N
۰/۰۰۸	۰/۱۴	۰/۲۵	۰/۷۴	۰/۲۲	A0.6N
۰/۰۱۲	۰/۱۴	۰/۲۵	۰/۷۴	۰/۲۲	A0.9N

### ج ۶. درصد انواع افزودنی‌ها برای انواع مخلوط ساخته شده (خرده چوب، الیاف خرما، پوسته برنج و کاه).

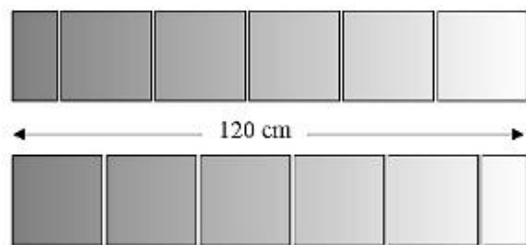
مقدار آبی که به مخلوط اضافه می‌شود برحسب مقدار رس و حالت اشباع با سطح خشک مصالح (SSD) تعیین شده است. هر یک از نمونه‌های خشتی در شرایط یکسان دما (متوسط  $23^{\circ}C$ ) در شرایط آزمایشگاهی خشک شده و برای خشک کردن نمونه‌ها هر ۲۴ ساعت یک بار جابجا می‌شدند تا تمام قسمت‌های آجر خشک شود و برای این که به‌صورت یکنواخت خشک شوند پلاستیک بر روی نمونه‌ها انداخته شد تا سریع رطوبت خود را از دست ندهند و در آن‌ها ترک‌های ناشی از خشک شدن سریع و نامتقارن به‌وجود نیاید. ۲۸ روز مدت زمانی بود که برای خشک شدن تمام نمونه‌ها در نظر گرفته شد.

### آماده‌سازی ملات

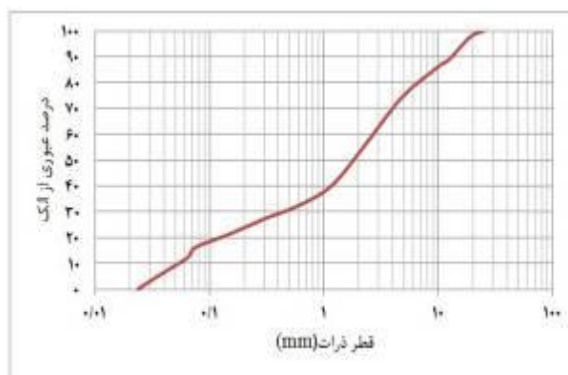
درصد‌های مصالح مورد استفاده در ملات در جدول شماره ۷ آورده شده است.

نوع ملات	رس (%)	ماسه (%)	آب (%)	کاه (%)
ملات معمولی	۶۴/۵	۱۶/۱	۱۹/۴	-----
ملات کاه	۶۴	۱۶	۱۹/۲	۰/۸

### ج ۷. درصد‌های ترکیب ثابت برای ساخت انواع ملات.



ت ۵. رج زوج و فرد برای چیدن دیوارهای نمونه.



ن ۱. دانه بندی مصالح مورد استفاده در خشت براساس (ASTM D422-87 و D421-58).

### آماده سازی دیوار خشتی

دیوار کاری توسط ابزار بنایی انجام شده است، افقی بودن رج ها و شاقولی بودن دیوار مورد توجه قرار گرفت. ضمناً رج ها طوری چیده شده اند که درزهای ملات روی هم قرار نگیرند. نمونه های ساخته شده به ترتیب جدول شماره ۹ بوده اند.

نمونه	بلوک (B)	ملات (M)	نام
۱	معمولی	معمولی	Bt-Mt
۲	معمولی	مسلح	Bt-Mr
۳	مسلح	مسلح	Br-Mr

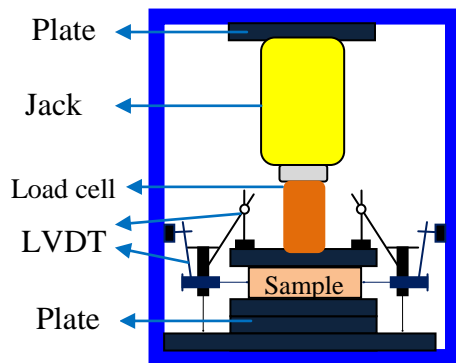
### ج ۹. اسم گذاری انواع دیوار.

پسوند t نشانه معمولی و پسوند F نشانه تقویت شده است. برای چسبیدن بهتر ملات به خشت، سطح خشت ها هنگام استفاده مرطوب شده اند. پلان دیوار ساخته شده به صورت تصویر شماره ۵ بوده است.

### روش های انجام آزمایش

روش های انجام آزمایش بر روی بلوک های خشتی با افزودنی های طبیعی و بلوک های تهیه شده برای ساخت دیوار آزمایش فشاری

در استاندارد شماره ۷ ایران، برای سرعت بارگذاری مقداری مشخص نشده است. به همین جهت در مورد سرعت بارگذاری از آئین نامه های معتبر ASTM و BS استفاده شده است. در آئین نامه ASTM ابتدا تا نصف بار ماکزیمم مورد انتظار، بار با هر سرعت معمولی مناسب اعمال می شود، سپس سرعت دستگاه آزمایش چنان کنترل می شود که تا لحظه شکست بار اعمالی با یک سرعت یکنواخت بین ۱ تا ۲ دقیقه باقی بماند. در آئین نامه BS بار بدون هیچگونه شوک در یک سرعت معمولی کمتر از  $35 \text{ N/mm}^2/\text{min}$  تا نصب مقدار بار ماکزیمم مورد انتظار، اعمال می شود. سپس به طور آرام سرعت بارگذاری را به  $15 \text{ N/mm}^2/\text{min}$  رسانیده و تا لحظه شکست این سرعت باقی خواهد ماند. پایان آزمایش لحظه ای است که عقربه نیروسنج دستگاه آزمایش از حد نهایی بالاتر نرود [۱۴ و ۱۵]. برای انجام آزمایش فشاری تجهیزات زیر استفاده شده اند:



ت ۶. مشخصات آزمایش فشاری بر روی بلوک‌های خشتی.



ت ۷. دستگاه انجام آزمایش.

### آزمایش دوام در برابر آب‌شستگی:

یکی از مشکلات سازه‌های خشتی مشکلات سطحی ایجاد شده به دلیل عبور آب بوده است [۱۷]. بلوک‌های ساخته شده از مواد رسی (به‌عنوان چسباننده) مقاومت فشاری  $4/5 - 3$  مگاپاسکال را تحمل کرده‌اند. اما دیوارهای ساخته شده از خشت و بلوک‌های فشرده، خراب و نرم شده‌اند، هنگامی که اشباع شده‌اند. دیوارهای ساخته شده از بلوک‌های خشتی باید در مقابل رطوبت ناشی از باران و شرایط جوی محافظت شوند [۱۸].

برای اندازه‌گیری دوام در برابر آب‌شستگی، چون عبور جریان آب بر روی گنبدها اتفاق می‌افتد، به‌عنوان معیاری برای مقایسه، در کانالی به عرض ۱۶ سانتی‌متر و شیب

دستگاه دیتالاگر<sup>۴</sup>: برای جمع‌آوری لحظه به لحظه نیرو و تغییر مکان.

جک هیدرولیک<sup>۵</sup>: برای اعمال نیروی فشاری.

نیروسنج<sup>۶</sup>: برای اندازه‌گیری نیروی فشاری اعمالی.

تغییر مکان سنج<sup>۷</sup>: برای اندازه‌گیری تغییر مکان.

قطعه فلزی: برای پخش نیروی فشاری بر روی کل سطح نمونه.

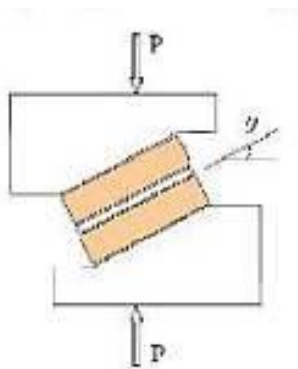
ماسه نرم: برای پخش بهتر بار بر روی سطح نمونه‌ای که سطح آن کاملاً صاف نیست.

فیلم عکس رادیوگرافی: برای اینکه ماسه مرتبط با سطح نمونه، در داخل نمونه فرو نرود و ترک‌های نمونه را حین بارگذاری پرنکند. طبق مشخصات آزمایش در کار پیاتونی<sup>۸</sup> و همکاران [۱۶].

در این آزمایش طبق تصویر شماره ۶، ابتدا روی تکیه‌گاه پایین صفحه‌ای فلزی قرار داده شده و سپس لایه‌ای از ماسه روی آن ریخته شده و بعد لایه نازک فیلم عکاسی روی آن قرار گرفته است، سپس نمونه روی فیلم قرار گرفته و سپس، روی نمونه نیز فیلم قرار گرفته است و باز روی فیلم لایه‌ای از ماسه و پس از آن صفحه فلزی قرار گرفته تا بار به‌صورت گسترده به نمونه وارد شود [۱۶]. سپس از یک عدد جک هیدرولیک برای اعمال بار فشاری و یک عدد نیروسنج برای دانستن بار وارده استفاده شده و برای دانستن تغییر مکان‌های عرضی و طولی (طول اولیه ۲۲ سانتی‌متر) دو تغییر مکان‌سنج و برای تغییر مکان ارتفاعی (طول اولیه ۷ سانتی‌متر)، نیز دو تغییر مکان‌سنج نصب شده‌اند.

به دلیل اینکه برای خشت نمی‌توان محل خاصی را به‌عنوان اتمام آزمایش در نظر گرفت اعمال بار تا جایی صورت گرفته که بار برگشت کرده است.

نمونه‌های دوتایی برای انجام آزمایش برشی.



ت ۱۰. شمای آزمایش مقاومت برشی مصالح بنایی.

روش‌های انجام آزمایش بر روی انواع دیوار

شش نمونه با ابعاد  $120 \times 120 \times 22$  cm ساخته شده است. ملات و بلوک دو دیوار شاهد معمولی بوده، بلوک دو دیوار دیگر معمولی و ملات آن تقویت شده و ملات و بلوک دو دیوار مسلح شده، تقویت شده و استفاده شده است. نمونه دیوارهای خشتی ساخته شده بعد از ۲۸ روز مورد آزمایش قرار گرفته‌اند. برای مشاهده بهتر ترک‌های ایجاد شده در حین آزمایش، بر روی دیوار توسط دوغاب آهک سفیدکاری انجام شده است. برای جلوگیری از آسیب دیدن نمونه‌ها قبل از آزمایش، نمونه‌ها در نزدیکی محل آزمایش ساخته شده و اطراف دیوارها چوب قرار داده شده سپس درون قاب فلزی پیچ و مهره‌ای جایگذاری شده و جابجایی توسط جرثقیل، همراه با قاب صورت گرفته است و پس از قرار گرفتن در زیر جک، به آرامی قاب فلزی و قطعات چوبی برداشته شده‌اند.

برای توزیع بهتر نیروی فشاری و خرد نشدن گوشه‌ها تحت بار متمرکز، در قسمت بالا و پایین دیوار قطعات چوبی قرار داده شده است [۷]. سپس در بالای دیوار و در زیر جک هیدرولیکی نیروسنج قرار داده شده است. برای اندازه‌گیری تغییر مکان دیوار در دو راستای قطر،

درجه، جریان آبی با سرعت  $8/6$  سانتی‌متر در هر ثانیه روان شده و نمونه‌ها به صورت طولی در کانال قرار داده شده‌اند و زمان آب‌شستگی نمونه‌ها اندازه‌گیری شده است. در این آزمایش از نمونه‌های نصف خشت (۲۲) در ۱۱ در ۷ سانتی‌متر) استفاده شده است. در تصویر شماره ۸ نحوه انجام آزمایش نمایش داده شده است.

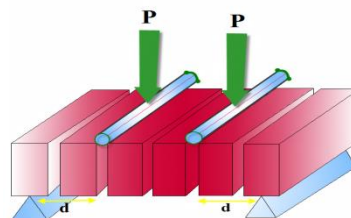


ت ۸. آزمایش نمونه‌ها در جریان آب.

روش‌های انجام آزمایش بر روی ملات‌های مختلف:

روش‌های انجام آزمایش بر روی ملات

ملات در دو نوع معمولی و تقویت شده در ابعاد زیر ساخته شده و مورد بررسی قرار گرفته است:  
نمونه‌های در ابعاد  $5 \times 5 \times 5$  سانتی‌متری برای انجام آزمایش فشاری؛ (مشابه تصویر شماره ۷)  
نمونه‌های در ابعاد  $4 \times 4 \times 16$  سانتی‌متری برای انجام آزمایش خمشی؛  
نمونه‌های ۵ تایی به ارتفاع ۴۰ سانتی‌متری برای انجام آزمایش فشاری؛ (مشابه تصویر شماره ۷)  
نمونه‌های ۶ تایی با فاصله دهانه ۴۵ تا ۱۵ سانتی‌متر برای انجام آزمایش خمشی ۲ نقطه‌ای.



ت ۹. شمای آزمایش خمشی بر روی نمونه‌های منشوری ساخته شده با ۶ ردیف خشت.

\*چون کاه و لیف خرما طول بیشتری نسبت به سایر افزودنی‌ها داشته‌اند، با متصل کردن نواحی مختلف نمونه باعث یکپارچگی نمونه و در نتیجه ادامه ترک‌های حاصله به وسط نمونه شده‌اند. افزایش درصد افزودنی لیف خرما و کاه باعث شده که ترک‌های بیشتری با عرض کمتر به وجود آید. \*با اضافه شدن درصد کاه و لیف خرما، نقش یکپارچه کردن نمونه بیشتر شده و تنش‌ها بیشتر پخش شده‌اند و افزایش درصد کاه و لیف خرما باعث نقش پل ماندی که در تحقیقات آیمریچ<sup>۹</sup> [۱۹] بدان اشاره شده، می‌شود. در نمونه‌های معمولی طبق تصویر شماره ۱۳ ترک‌های بزرگی به وجود آمده است.



ت ۱۲. ترک‌های ایجاد شده در نمونه (C+S+G) در آزمایش فشاری.



ت ۱۳. ترک‌های ایجاد شده در نمونه (C+S+G+0/9P) در آزمایش فشاری.

\*چون نمونه‌های معمولی، فاقد الیاف بوده و در نتیجه نقش پل مانند الیاف در آن‌ها به وجود نیامده، ترک‌ها پس از ایجاد بلافاصله گسترش یافته است. در نمونه‌های دارای افزودنی پوسته برنج و خرده چوب

تغییر مکان سنج نصب شده است. تصویر شماره ۱۱ مشخصات دیوار را قبل از شروع آزمایش نشان می‌دهند.



ت ۱۱. آماده‌سازی دیوار قبل از تست.

### نتایج آزمایش فشاری بلوک‌های خشتی با افزودنی‌های طبیعی

برای هر ترکیب سه نمونه آزمایش شده‌اند. از آنجا که خرابی نمونه‌های خشتی لحظه‌ای نیست و حتی وقتی نمونه دچار خرابی شده گاهی هنوز تحمل بار داشته‌اند، نیروی فشاری تا وقتی اعمال شده که نمونه‌ها دچار ترک‌های زیادی شده‌اند و بار برگشت کرده است.

### نتایج مشاهده‌ای

در همه نمونه‌ها طبق تصاویر ۱۲ و ۱۳، گوشه‌های نمونه دچار خرابی شده‌اند.

\*دلیل این خرابی به‌خاطر تراکم کمتر گوشه‌ها در هنگام ساخت، تمرکز تنش و سریع‌تر خشک شدن گوشه‌ها بوده است.

در نمونه‌های با افزودنی کاه و لیف خرما طبق تصویر شماره ۱۳، گوشه‌های نمونه دچار خرابی شده‌اند و ترک‌های عمودی در گوشه‌ها به وجود آمده‌اند و تا وسط سطح عمودی نمونه ادامه داشته‌اند.

گوشه نمونه‌ها، کاملاً خرد شده‌اند.

\*تحلیل: چون پوسته برنج و خرده چوب، فاقد طول مؤثر برای اتصال نواحی مختلف مخلوط به یکدیگر بوده‌اند، لذا پس از شروع شدن ترک، نقشی در برابر باز شدگی ترک از خود نشان نداده‌اند.

### نتایج عددی

در ادامه، نیروی فشاری به دست آمده و مقدار تغییر مکان‌های عمودی و تغییر مکان‌های عرضی نمونه‌ها که از ثبت نتایج دستگاه دیتالاگر به دست آمده‌اند، مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته‌اند.

از تقسیم نیروی فشاری به دست آمده برای هر نمونه، بر سطح خالص هر نمونه، تنش فشاری هر نمونه به دست آمده است.

از تقسیم تغییر مکان عمودی به دست آمده هر نمونه، بر طول اولیه هر نمونه (که به‌طور میانگین ۷ سانتی‌متر بوده ولی برای هر نمونه جداگانه اندازه‌گیری شده است) کرنش‌های عمودی نمونه‌ها به دست آمده‌اند.

با استفاده از رابطه تنش و کرنش برای هر نمونه در فاصله ۰/۳ تا ۰/۶ تنش نهایی، مدول الاستیسیته هر نمونه به دست آمده است.

در جدول شماره ۱۰ نتایج به دست آمده از تحلیل نتایج نیروسنج و تغییر مکان سنج عمودی ارائه شده است: حداکثر تنش فشاری مربوط به نمونه‌های با الیاف خرما بوده (۹/۶۴، ۱۶/۵۳ و ۱۶/۳۵ مگا پاسکال) که با افزایش درصد لیف خرما تا حدی افزایش تنش فشاری، مشاهده شده ولی با افزایش بیشتر تنش فشاری کاهش یافته است. مقاومت فشاری نمونه‌های شامل الیاف خرما با ۰/۶ و ۰/۹ بیش از دو و نیم برابر نمونه‌های معمولی (دارای: رس، ماسه و شن) و نمونه دارای رس تنها بوده است.

\*با افزودن الیاف خرما به ترکیب، الیاف خرما با انتقال نیروی برشی از طریق پیوند با اجزای ترکیب باعث

جلوگیری از باز شدن ترک (چه در هنگام خشک شدن و چه در زیر بار که نمونه بشکته‌ای شده) شده است [۲۰]، از طرفی با افزودن الیاف خرما به ترکیب، الیاف در بین ذرات خاک قرار گرفته و اتصال و اصطکاک ذرات خاک کمتر شده است [۲۰] که با افزودن بیش از مقدار مطلوب باعث کاهش مقاومت فشاری کمتر از نمونه با ۰/۶ درصد الیاف شده است و در نمونه‌های بدون الیاف ترک‌ها بلافاصله پس از باز شدگی گسترش یافته‌اند و باعث خرابی نمونه شده‌اند.

نام نمونه	$\sigma_{max}(MPa)$	$\epsilon_{\sigma max}$	$E_{ex}(MPa)$
C	۴/۴	۰/۱۳	۳۷
C+S+G	۶/۴۴	۰/۲۴	۳۶
C+S+G+0/3W	۶/۱۴	۰/۱۶	۳۹
C+S+G+0/6W	۶/۹۱	۰/۲۲	۴۰
C+S+G+0/9W	۶/۴۴	۰/۲۸	۴۶
C+S+G+0/3P	۹/۶۴	۰/۲۳	۴۵
C+S+G+0/6P	۱۶/۵۳	۰/۳۹	۴۱
C+S+G+0/9P	۱۶/۳۵	۰/۲۹	۶۷
C+S+G+0/3R	۴/۱۴	۰/۰۸	۲۷
C+S+G+0/6R	۲/۹۸	۰/۱۹	۲۰
C+S+G+0/9R	۲/۶۷	۰/۱۷	۱۸
C+S+G+0/3S	۶/۹۵	۰/۱۳	۲۹
C+S+G+0/6S	۸/۶۴	۰/۳۲	۳۲
C+S+G+0/9S	۸/۷۱	۰/۳۹	۳۳

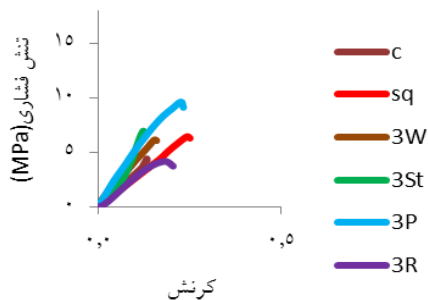
### ج ۱۰. نتایج عددی به دست آمده در آزمایش فشاری نمونه‌های با افزودنی طبیعی.

با توجه به جدول شماره ۱۰، نتایج زیر به دست آمده است:

حداقل تنش فشاری مربوط به نمونه‌های با افزودنی پوسته برنج (۴/۱۴، ۲/۶۷ و ۲/۹۸ مگا پاسکال) بوده است و نمونه با درصد ۰/۳ پوسته برنج تنش فشاری بیشتر نسبت به درصد‌های ۰/۶ و ۰/۹ داشته است.

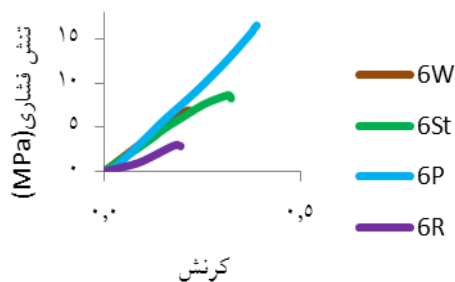
حسب درصد وزنی افزودنی‌های ۰/۳، ۰/۶ و ۰/۹ نمودارها در سه دسته ترسیم شده‌اند.

رطوبت به دست آمده نمونه‌ها در هنگام آزمایش به طور میانگین ۳٪ - ۲ بوده است.

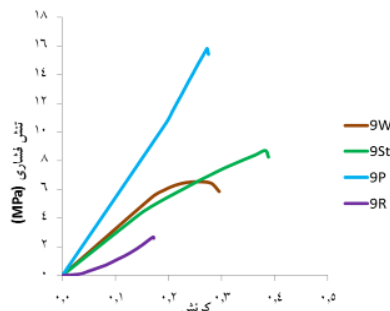


ن ۲. نمودار مقایسه نتایج نمونه‌های با ۰/۳ درصد افزودنی طبیعی.

در نمودار شماره ۵ مقاومت فشاری نمونه‌های با انواع افزودنی طبیعی، نمونه معمولی و نمونه دارای رس تنها، با یکدیگر مقایسه شده‌اند.



ن ۳. نمودار مقایسه نتایج نمونه‌های با ۰/۶ درصد افزودنی طبیعی.



ن ۴. نمودار مقایسه نتایج نمونه‌های با ۰/۹ درصد افزودنی طبیعی.

\*ذرات پوسته برنج الیافی نبوده و نقشی در جلوگیری از باز شدن ترک نداشته‌اند، از طرفی با فاصله‌انداختن بین ذرات خاک، باعث کم کردن چسبندگی رس با سایر اجزا و کاهش اصطکاک اجزا شده‌اند [۲۰] و نمونه با درصد کمتر پوسته برنج کاهش تنش فشاری کمتری داشته، چون نقش کمتری در مداخله در عملکرد خاک داشته است.

نمونه‌های دارای افزودنی خرده چوب، افزایش و کاهش قابل توجهی در تنش فشاری نداشته‌اند.

\*چون خرده چوب نه از جنس الیاف است و نه پودر شکل، در مورد نقش آن به درستی نمی توان قضاوت کرد. ولی مقدار بیش از حد آن با فاصله‌انداختن بین اجزای خاک باعث مختل کردن عملکرد چسبندگی رس و اصطکاک دانه‌ها شده است.

افزودنی کاه، باعث افزایش مقاومت فشاری نسبت به نمونه‌های معمولی شده است. با افزایش درصد باعث افزایش مقاومت شده ولی مقاومت فشاری آن نصف مقاومت فشاری نمونه‌های دارای الیاف خرما بوده است.

\*عملکرد جلوگیری از باز شدن ترک کاه مشابه لیف خرما بوده، با این تفاوت که لیف خرما مقاومت کششی بالاتری داشته و دارای الیافی توپر و با قطر کمتر بوده است و به دلیل نازک تر بودن پراکندگی بیشتری در نمونه داشته است.

پیاتونی و همکارانش نیز نشان داده‌اند که با افزایش نسبت ابعاد (تقسیم ارتفاع به قطعات ریزتر) مقاومت فشاری و میانگین عملکرد کرنش نمونه‌ها کاهش یافته است. همان‌طور که در اینجا مشاهده شده نمونه‌هایی که افزودنی آن‌ها طول در برابر بعد بیشتری داشته‌اند، عملکرد بهتری داشته‌اند.

مدول الاستیسیته رابطه یکنواختی با نسبت ابعاد نداشته است [۱۶].

با استفاده از نتایج عددی تنش و کرنش نمونه‌ها در هر لحظه نمودار تنش و کرنش نمونه‌ها ترسیم شده است، بر

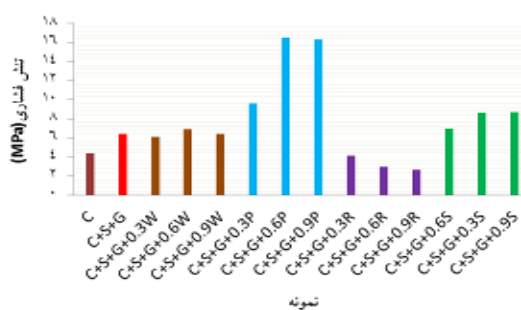
آب در بین ذرات خاک اصطکاک آن نیز از بین رفته و نمونه از هم پاشیده شده است. از طرفی وجود افزودنی در خاک وقتی که افزودنی جذب آب داشته، با متورم شدن در اثر جذب آب باعث بستن لوله‌های موئین شده است.

### نتایج عددی

با توجه به نمودار شماره ۶، نتایج زیر به دست آمده‌اند: نمونه‌های دارای افزودنی پوسته برنج، زمان بیشتری برای آب‌شستگی نیاز داشته‌اند. با افزایش درصد وزنی این افزودنی، دوام در برابر آب‌شستگی افزایش یافته است. \*تحلیل: از آنجا که پوسته برنج ذرات بسیار ریزی داشته، باعث ایجاد لوله‌های موئین کمتری شده و از طرفی با اشباع شدن پوسته برنج طبق جدول شماره ۵، چون جذب آب بالاتری داشته، باعث تورم و بسته شدن لوله‌های موئین شده است، از طرفی ذرات پوسته برنج چسبندگی و فعالیت رس را کاهش داده‌اند و باعث دیرتر اشباع شدن نمونه‌ها شده‌اند و با افزایش درصد عملکرد مختل کردن چسبندگی رس و متورم شدن در اثر جذب رطوبت بیشتر شده است.

نام نمونه	مدت زمان دوام در برابر آب شستگی (min)
C	۲۵۵
C+S+G	۲۸۵
C+S+G+0/3W	۳۸۵
C+S+G+0/6W	۳۸۰
C+S+G+0/9W	۳۵۰
C+S+G+0/3P	۳۰۵
C+S+G+0/6P	۳۲۰
C+S+G+0/9P	۳۵۰
C+S+G+0/3Rh	۵۵۳
C+S+G+0/6Rh	۵۵۰
C+S+G+0/9Rh	۵۶۰
C+S+G+0/3St	۵۴۷
C+S+G+0/6St	۵۴۹
C+S+G+0/9St	۵۵۳

ج ۱۱. مدت زمان دوام در برابر آب شستگی نمونه‌های با افزودنی طبیعی.



ن ۵. نمودار مقایسه نتایج نمونه‌های با افزودنی طبیعی.

### نمودار مقایسه نتایج نمونه‌های با افزودنی طبیعی نتایج آزمایش دوام در برابر آب شستگی نمونه‌های دارای افزودنی‌های طبیعی

پایان آزمایش دوام در برابر آب شستگی زمانی در نظر گرفته شده است که نمونه کاملاً اشباع شده و گوشه‌ها دچار آب‌شستگی شده و از نمونه جدا شده‌اند.



ت ۱۴. نمونه آب شسته.

نتایج آزمایش در برابر آب‌شستگی به شرح زیر به دست آمده است:

رخداد آب‌شستگی به صورت زیر بوده است: ابتدا نمونه کاملاً اشباع شده (که اشباع شدن به دلیل وجود خاک رس به عنوان جاذب آب و لوله‌های موئین که در اثر ترک‌های موجود در نمونه وجود داشته‌اند، بوده است). سپس با اشباع کامل نمونه رس آن متورم شده و نقش کششی خود را از دست داده و با جایگزینی ذرات

طرفی جنس آن به قسمی بوده که افزایش قابل توجهی در بستن لوله‌ها ناشی از تورم نداشته است.

در نمونه‌های دارای افزودنی گاه، دوام در برابر آب‌شستگی پس از پوسته‌برنج بالا بوده و با افزایش درصد وزنی دوام در برابر آب‌شستگی بهبود یافته است.

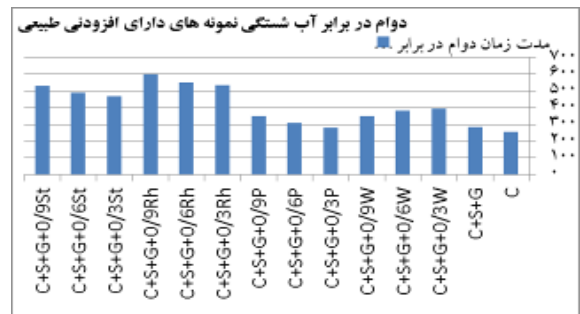
\* گاه از جنس الیاف بوده، لذا افزایش درصد آن باعث یکپارچه شدن نمونه شده، از طرفی پس از پوسته‌برنج، گاه جذب آب بالایی داشته و در نتیجه چون ساختار آن توخالی بوده، آب در داخل آن نفوذ کرده و باعث متورم شدن آن و در نتیجه بستن لوله‌های موئینه شده است.

### نتایج آزمایش بلوک‌های خشتی استفاده شده در دیوار

مقاومت فشاری هر یک از خشت‌ها تحت آزمایش فشاری با استفاده از جک هیدرولیکی و تغییر مکان‌سنج اندازه‌گیری شده است. برای به دست آوردن مقاومت فشاری بلوک‌ها، ۵ عدد از هر کدام از ابعاد، مورد آزمایش قرار گرفته‌اند. نتایج مقاومت فشاری میانگین ۵ نمونه آزمایش شده برای مقاومت فشاری نیم‌خشت و خشت به ترتیب با ابعاد  $22 \times 11 \times 7$  cm و  $22 \times 22 \times 7$  cm در جداول شماره ۱۲ و ۱۳ نمایش داده شده است. مقاومت فشاری خشت‌های با ابعاد  $22 \times 11 \times 7$  cm کمتر از مقاومت فشاری خشت‌هایی با ابعاد  $22 \times 22 \times 7$  cm می‌باشد، که یکی از دلایل آن سطح توزیع تنش کمتر و متفاوت بودن شکل نمونه‌های  $22 \times 11 \times 7$  cm که به صورت مستطیل و نمونه‌های  $22 \times 22 \times 7$  cm به صورت مربع می‌باشند.

P=F/A (MPa)	F (kN)	سطح باربر			حالت
		A (mm <sup>2</sup> )	b (mm)	l (mm)	
۴/۳۷	۷۰/۰۴	۲۴۴۲۰	۱۱۱	۲۲۰	خشت
۳/۲۹	۹۴/۳	۲۳۸۷۱	۱۰۹	۲۱۹	نیم خشت

ج ۱۲. مقاومت فشاری متوسط بلوک‌های معمولی ساخته شده برای ساخت دیوار.



ن ۶. نمودار مقایسه بین زمان لازم برای آب‌شستگی در نمونه‌های دارای افزودنی طبیعی و نمونه معمولی و نمونه دارای رس تنها.

کمترین زمان لازم برای آب‌شستگی مربوط به نمونه‌های معمولی و دارای رس تنها و پس از آن نمونه‌های دارای الیاف خرما بوده است.

\* نمونه‌هایی که هیچ افزودنی نداشته‌اند، رس عملکرد خود را انجام داده و نمونه را سریع اشباع کرده است. همانطور که باز هم در نتایج مشاهده شده نمونه دارای رس تنها از همه زودتر آب‌شسته شده که به دلیل لوله‌های موئین بیشتر (که در هنگام خشک شدن ایجاد شده‌اند)، اشباع و کاهش چسبندگی، سریع‌تر بوده است و در نمونه دارای الیاف خرما، چون دارای افزودنی توپری بوده است، جذب آب کمتر و در نتیجه تورم کمتر داشته و باعث بستن لوله‌های موئین نشده است. ولی از طرفی، الیاف بودن در ترکیب باعث خاصیت پل مانن، بین ترکیبات خاک شده و از پاشیدن نمونه جلوگیری کرده است. به همین دلیل افزایش درصد وزنی الیاف خرما باعث دوام بیشتر نمونه در برابر آب‌شستگی شده است.

در افزودنی دارای خرده چوب، با افزایش درصد وزنی خرده چوب، دوام در برابر آب‌شستگی کاهش یافته است. \* خرده چوب چون نه الیاف بوده و نه پودر، شناسایی عملکرد آن پیچیده است. افزایش درصد وزنی خرده چوب، باعث افزایش لوله‌های موئینه شده است و از

نمونه‌های با ملات ساده و کاهگل به ترتیب برابر است با ۱۳۶ و ۱۲۴ مگا پاسکال به دست آمده است.

نوع ملات	مقاومت خمشی (MPa)
معمولی	۱/۷۳
تقویت شده با کاه	۰/۸۲

ج ۱۵. نتایج مقاومت خمشی ملات.

### نتایج مقاومت فشاری نمونه‌های ۵ تایی

برای انجام این آزمایش ۵ عدد بلوک خشتی با ملات گل و کاهگل با درصدهای به کار رفته در دیوار ساخته شده است، در تصویر شماره ۱۵ نمونه‌های نمایش داده شده است. تعداد ۳ نمونه از هر نوع ملات ساخته شد. نتایج مقاومت میانگین فشاری در جدول شماره ۱۶ نمایش داده شده است.



ت ۱۵. نمونه‌های ۵ تایی برای آزمایش فشاری.

شماره نمونه	نوع ملات	مقاومت فشاری میانگین به دست آمده MPa
۱	ملات ساده	۰/۵۹
۲	ملات کاه	۰/۶۵

ج ۱۶. میانگین مقاومت فشاری نمونه‌های ۵ تایی.

### آزمایش خمشی

در این روش مقاومت کشش با انجام آزمایش خمشی بر روی سه منشور ساخته شده برای هر نوع از خشت‌ها

برای آزمایش خمشی ملات‌های ساخته شده در قالب‌های  $4 \times 4 \times 16$  cm ریخته شده‌اند، به مدت ۲۴ ساعت در شرایط آزمایشگاهی در قالب باقی مانده، سپس از قالب خارج شده‌اند. پس از ۲۸ روز که در شرایط محیطی مورد نظر عمل آمدند با دستگاه مخصوص آزمایش مقاومت خمشی شکسته شده و مقاومت آن‌ها تعیین گردید. نتایج مقاومت خمشی ملات در جدول شماره ۱۵ نشان داده شده است.

همان طور که در نتایج مشاهده می‌شود، در ابعاد مورد آزمایش کاه عملکرد خوبی از خود نشان نداده و با افزودن کاه مقاومت خمشی کاهش یافته است. هر چه ابعاد نمونه‌ها افزایش پیدا کند، کاه در مقاومت فشاری و کششی تأثیر بیشتری از خود نشان می‌دهد و باعث افزایش مقاومت فشاری و کششی می‌شود، این نتایج در کار پیتونی و همکاران مشاهده می‌شود [۱۶].

P=F/A (MPa)	F (kN)	سطح باربر			شکل
		A (mm <sup>2</sup> )	b (mm)	l (mm)	
۳/۶	۷۰/۰۴	۲۴۴۲۰	۱۱۱	۲۲۰	خشت
۲/۳۶	۹۴/۳	۲۳۸۷۱	۱۰۹	۲۱۹	نیم خشت

ج ۱۳. مقاومت فشاری متوسط بلوک‌های معمولی ساخته شده برای ساخت دیوار.

### نتایج آزمایش بر روی انواع ملات

نتایج آزمایش مقاومت فشاری بر روی نمونه‌های ۵ در ۵ سانتی متر در جدول شماره ۱۴ آورده شده است.

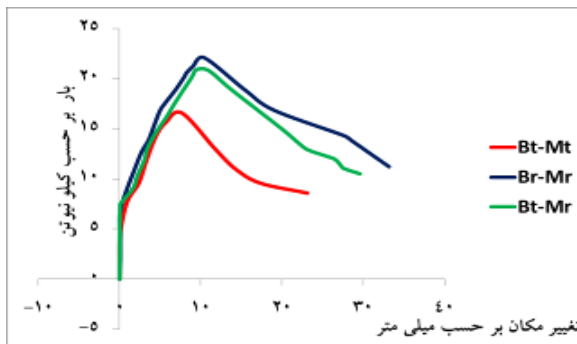
نوع ملات	مقاومت فشاری میانگین (MPa)
معمولی	۳/۲۹
دارای افزودنی کاه	۱/۹۱

ج ۱۴. نتایج مقاومت فشاری میانگین ملات.

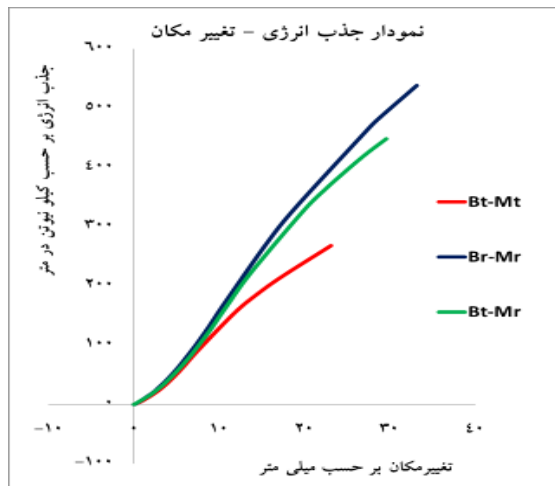
نمودار تنش کرنش نمونه با ملات معمولی و ملات مسلح شده در نمودار شماره ۷ نمایش داده شده است. مقادیر ضریب ارتجاعی از روی نمودار برای این

### نتایج آزمایش بر روی انواع دیوار

منحنی بار-تغییر مکان به صورت میانگین برای دیوارهای خشتی در نمودار شماره ۸ نشان داده شده است. نمودار جذب انرژی-تغییر مکان<sup>۱</sup> دیوارهای خشتی که جذب انرژی به عنوان تابعی از تغییر مکان می‌باشد، در نمودار شماره ۹ نمایش داده شده است. در نمودار شماره ۱۰ نمودار مقایسه‌ای بین جذب انرژی نهایی دیوار شاهد، دارای ملات تقویت شده و دارای بلوک و ملات تقویت شده، نشان داده شده است.



ن ۸. میانگین نمودار بار-تغییر مکان دیوارهای خشتی.



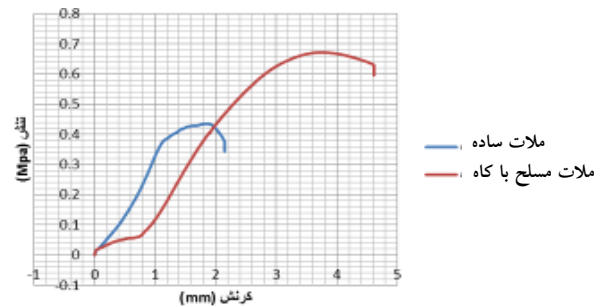
ن ۹. نمودار جذب انرژی-تغییر مکان دیوارهای خشتی.

حضور الیاف تغییر قابل ملاحظه‌ای در پاسخ الاستیک و مقاومت اولیه تا رسیدن به ترک ایجاد نکرده، ولی

و ملات مطابق تصویر شماره ۱۶ تحت بارگذاری نشان داده شده، تعیین گردید. برای این تست ۶ عدد خشت استفاده شده است. نتایج آزمایش برای خشت تقویت شده در جدول شماره ۱۸ آورده شده است.



ت ۱۶. آزمایش خمشی بر روی نمونه‌های منشوری ساخته با ۶ ردیف خشت



ن ۷. نمودار تنش - کرنش نمونه ملات‌ها.

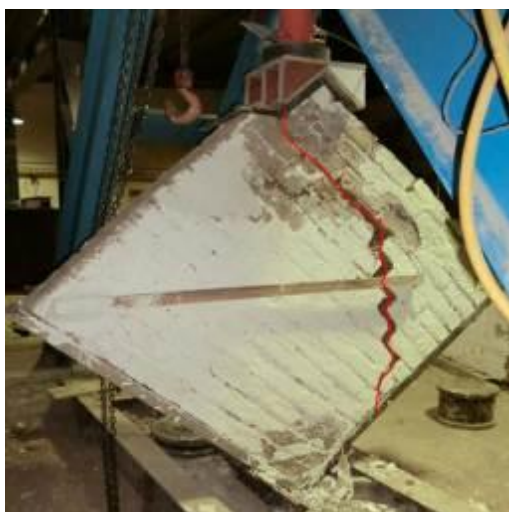
### نتایج آزمایش برشی

نمونه	بار حدی P (kN)	تنش برشی (Mpa)	تنش فشاری (Mpa)	ضریب اصطکاک داخلی	زاویه اصطکاک داخلی
ملات ساده	۳۴/۰۷۶	۰/۴۹۸	۰/۸۴۹	۰/۹۹۹۸۹	۴۴/۹۹۷۷
ملات کاه	۳۸/۶۹۶	۰/۵۶۷	۰/۵۶۷	۰/۹۹۹۸۵	۴۴/۹۹۵۶

ج ۱۷. میانگین نتایج به دست آمده از تست برشی.

نمونه	نیروی P (N)	فاصله d (mm)	گشتاور (N.mm)	تنش کششی (Mpa)
ملات ساده	۱۳	۱۵۰	۹۷۵	۰/۰۰۲۲
ملات کاه	۱۴	۱۵۰	۹۷۵	۰/۰۰۲۴

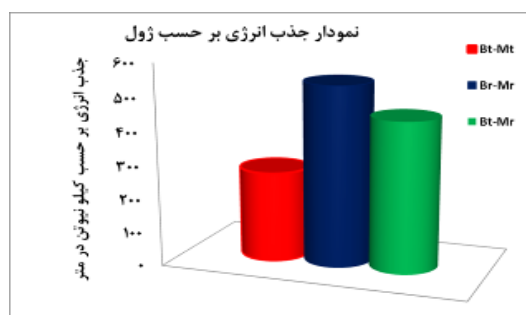
ج ۱۸. میانگین نتایج آزمایش تیر خمشی مصالح بنایی خشت تقویت شده.



ت ۱۸. ترک‌های ایجاد شده در دیوار خشتی با ملات ساده پس از آزمایش کشش قطری.

در آزمایش کشش قطری در همه نمونه‌ها، شکست دیوار از ملات رخ داده که نشان‌دهنده این است که ملات ضعیف‌ترین قسمت دیوارهای خشتی می‌باشد. در دیوار با ملات ساده ترک در راستای ملات ایجاد شده، این ترک در راستای ضعیف‌ترین ملات ایجاد شده است. این ترک در تصویر شماره ۱۸ نشان داده شده است. ترک‌های ایجاد شده در دیوار با ملات کاهگل در تصویر شماره ۱۹ آورده شده است. در نمونه‌های دارای ملات تقویت شده با کاه دیوار ملات عملکرد بهتری داشته و ترک‌های بیشتر و با عمق کمتر در دیوار ایجاد شده است. الیاف کاه در ملات از انقباض خاک رس جلوگیری کرده و از ایجاد ترک‌های عمیق و زیاد در ملات جلوگیری می‌کند. همان‌طور که در نمودارها مشاهده می‌شود رفتار هر دو دیوار در قسمت الاستیک یکسان است. بنابر قانون موهركلمب رفتار برشی وابسته به دو پارامتر چسبندگی و اصطکاک می‌باشد. در ملات کاهگل اصطکاک بیشتر به خاطر وجود الیاف کاه ایجاد شده است، چون الیاف کاه دارای چسبندگی نمی‌باشند

در مقابل تا حد زیادی مقاومت پس از ترک اولیه، شکل‌پذیری و انرژی جذب شده نمونه‌های دارای الیاف بهبود یافته است که این نتایج با مرجع [۲۱] نیز همخوانی دارد. در نمونه‌های تقویت شده با الیاف، افت پس از نقطه اوج کمتر است و رفتار شکننده شن و ماسه تا حدودی انعطاف‌پذیرتر شده است [۱۶].



ن ۱۰. نمودار مقایسه جذب انرژی دیوارهای خشتی.

در دیوارهایی که از ملات گل استفاده شده بعد از شکست دیوار ملات به دلیل انقباض خاک رس و از دست دادن آب دچار ترک‌هایی زیادی شده است، به طوری که ملات به قطعات کوچکتری از ۲ تا ۸ سانتیمتر تقسیم شده است (تصویر شماره ۱۸). ملات کاهگل نسبت به ملات معمولی ترک‌های کمتر مشاهده می‌شود که کاه تا حدودی از انقباض خاک رس جلوگیری می‌کند و مانع ایجاد ترک در ملات می‌شود (تصویر شماره ۱۷).



ت ۱۷. الف- ملات گل ب- ملات کاهگل.

افزودن خرده چوب به ترکیب شن، ماسه و رس باعث افزایش ۷ درصدی در مقاومت فشاری، افزایش ۱۶ درصدی در کرنش نهایی و افزایش ۳۹ درصدی در مدت زمان دوام در برابر آب‌شستگی، نسبت به نمونه دارای ترکیب شن، ماسه و رس شده است.

افزودن الیاف خرما به ترکیب شن، ماسه و رس باعث افزایش ۱۵۶ درصدی در مقاومت فشاری، افزایش ۶۲/۵ درصدی در کرنش نهایی و افزایش ۲۳ درصدی در مدت زمان دوام در برابر آب‌شستگی نسبت به نمونه دارای ترکیب شن، ماسه و رس شده است.

افزودن پوسته برنج به ترکیب شن، ماسه و رس باعث کاهش ۴۱ درصدی در مقاومت فشاری، کاهش ۶۶ درصدی در کرنش نهایی و افزایش ۱۱۱ درصدی در مدت زمان دوام در برابر آب‌شستگی نسبت به نمونه دارای ترکیب شن، ماسه و رس شده است.

افزودن کاه به ترکیب شن، ماسه و رس باعث افزایش ۳۵ درصدی در مقاومت فشاری، افزایش ۶۲/۵ درصدی در کرنش نهایی و افزایش ۸۶ درصدی در مدت زمان دوام در برابر آب‌شستگی نسبت به نمونه دارای ترکیب شن، ماسه و رس شده است.

به‌طور کلی با افزودن افزودنی‌های طبیعی به ترکیب شن، ماسه و رس، مدت زمان دوام در برابر آب‌شستگی افزایش یافته است.

در بررسی نتایج دیوارهای موارد زیر به دست آمده‌اند: دیوارها از قسمت ملات ترک خورده‌اند لذا ضعیف‌ترین بخش دیوار خشتی ملات آن بوده است.

۱. با تقویت ملات دیوار خشتی نیروی نهایی آن ۲۵/۹۶٪، تغییر مکان نهایی آن ۲۸/۰۸٪ و جذب انرژی آن ۶۷/۲۸٪ نسبت به دیوار شاهد افزایش یافته است.

۲. با تقویت توأم بلوک و ملات دیوار خشتی نیروی نهایی آن ۵/۷۵٪، تغییر مکان نهایی آن ۱۲/۰۷٪ و جذب

و در صورت استفاده از الیاف، تأثیر خاک رس که به‌عنوان ماده چسبنده می‌باشد کاهش می‌یابد، در نتیجه حضور الیاف کاه باعث افزایش اصطکاک در ملات کاهگل و افزایش مقاومت و شکل‌پذیری در دیوار شده است.



ت ۱۹. ترک‌های ایجاد شده در دیوار خشتی با ملات کاهگل پس از آزمایش کشش قطری.

نمونه	Br-Mr	Bt-Mr	Bt-Mt
نیروی ماکزیم Kn	۲۲/۱۱	۲۰/۹۱	۱۶/۶
تغییر مکان در نیروی ماکزیم mm	۱۰/۴۱	۹/۴۲	۷/۶۵
تغییر مکان ماکزیم mm	۳۳/۱۶	۲۹/۵۹	۲۳/۱
سختی N/mm	۲۱۲۴/۱	۲۲۱۹/۷۵	۲۱۷۰
شکل‌پذیری	۳/۱۹	۳/۱۴	۳/۰۲
نیروی کششی ماکزیم (MPa)	۰/۰۶	۰/۰۵۹	۰/۰۴
انرژی جذب شده (J)	۴۴۹	۵۳۸/۵	۲۶۸

ج ۱۹. میانگین نتایج آزمایش دیوارهای خشتی.

### نتیجه

افزودن الیاف خرما و کاه باعث جلوگیری از ایجاد ترک‌های عمیق شده است.

افزودن شن و ماسه به ترکیب خشت باعث افزایش ۴۶ درصدی در مقاومت فشاری، افزایش ۸۴ درصدی در کرنش نهایی و افزایش ۱۲ درصدی در مدت زمان دوام در برابر آب‌شستگی شده است.

- Blondet, M, Garcia G Villa, Brzev S. Earthquake-resistant construction of adobe buildings: a tutorial. EERI/IAEEworld housing encyclopedia. <www.worldhousing.net>; 2003.
- Lutfullah, Turanli, Afsin Saritas. Strengthening the structural behavior of adobe walls through the use of plaster reinforcement mesh. *Construction and Building Materials* 25 (2011) 1747–1752
- A. Vatani Oskouei, M. Afzali, M. Madadipour. Effect of lime and rice husk ash stabilization and compaction on mud brick reinforced with synthetic fibers. *Structural Analysis of Historical Constructions – Jerzy Jasieńko 2012 DWE, Proland, 978-83-7125-216-7*
- A. Vatani Oskouei, M. Afzali, M. Madadipour. Effect of some natural additives on the mechanical properties of mud brick. *Structural Analysis of Historical Constructions – Jerzy Jasieńko 2012 DWE, Proland, 978-83-7125-216-7*
- A. Vatani Oskouei, M. Afzali, M. Madadipour. Effect of some synthetic fibers on the mechanical properties of mud brick. *Structural Analysis of Historical Constructions – 2012 DWE, Proland, 978-83-7125-216-7*
- Yetgin, S, Cavdar O, Cavdar A. The effects of the fiber contents on the mechanic properties of the adobes. *Construct Build Mater* 2008;22(3):2227.
- Dowling Dominic. 2004. Improved adobe mud brick in application – child-care center construction in El Salvador. 13th World Conference on Earthquake Engineering.
- ASTM, Volume 04.08, March (2003) Soil and Rock (I:D420-D5779).
- Department of Standards. 1985. British Standard Specification for Clay Bricks. London: DoF.
- American Standard Testing Material. 1997. ASTM Standards on Masonry, Third Edition. America: ASTM.
- Piattoni, Q., E. Quagliarini, and S. Lenci. 2011. Experimental analysis and modeling of the mechanical behavior of earthen bricks. *Construction and Building Material*, 25: 2067-2075.
- Idalia Gomes, Maria, Mario Lopes, and Jorge de Brito. 2010. Seismic resistance of earth construction in Portugal. *Engineering Structures*, 33: 932-941.
- Kouakou, C.H., Morel J.C. 2009. Strength and elastoplastic properties of non-industrial building materials manufactured with clay as a natural binder. *Appl Clay Sci*, 44: 27-34.
- Aymerich, F., L. Fenu, and P. Meloni. 2011. Effect of reinforcing wool fibres on fracture and energy absorption properties of an earthen material. *Construction and Building Materials*, 27: 66-72.
- Silveira, Dora, Humberto Varum, Anibal Costa, Tiago Martins, Henrique Pereira, and Joao Almeida. 2011. Mechanical properties of adobe bricks in ancient constructions. *Construction and Building Materials*, 28: 36-44.
- Yetimoglu Temel, Omer Salbas. 2002. A study on shear strength of sands reinforced with randomly distributed discrete fibers. *Geotextiles and Geomembranes* 21, 103–110.

انرژی آن ۲۰/۰۵٪ نسبت به دیواری که فقط ملات آن تقویت شده، افزایش یافته است.

۳. با تقویت توأم بلوک و ملات دیوار خشتی نیروی نهایی آن ۳۳/۲٪، تغییر مکان نهایی آن ۴۳/۵۳٪ و جذب انرژی آن ۱۰۰/۸۲٪ نسبت به دیوار شاهد افزایش یافته است.

لذا می‌توان با افزودن افزودنی‌های طبیعی کاه و لیف خرما به ملات و خشت، خواص مکانیکی دیوار خشتی را به‌طور قابل ملاحظه‌ای افزایش داد.

### پی‌نوشت

۱. بلوندت، Blondet
۲. داوولینگ، Dowling
۳. طبقه بندی سیستم متحد، USCS
۴. دیتالاگر، Data Logger
۵. جک هیدرولیک، Jack
۶. نیروسنج، Loadcell
۷. مکان‌سنج، LVDT
۸. پیاتونی، Piattoni
۹. آیمریچ، Aymerich
۱۰. نمودار جذب انرژی از محاسبه سطح زیر نمودار بار-تغییر مکان حاصل شده است.

### فهرست منابع

- میرگذار لنگرودی، میرعلی محمد؛ سیده صدیقه میرگذار لنگرودی و اکبر رجبی کشف گورابی، ۱۳۸۷، مقاومت‌سازی ساختمان‌های خشتی و گلی در مقابل زلزله، همایش ملی مقاومت‌سازی ایران، دانشگاه یزد.
- Turanli, L, Erdogan TY. Improving the mechanical properties of adobe blocks used in low-cost rural housing. In: XXIVth IAHS world housing congress, Ankara, Turkey; 1996.
- Revuelta-Acosta, JD, Garcia-Diaz A, Soto-Zarazua GM, Rico-Garcia E. Adobe as a sustainable material: a thermal performance. 2010;10(19):2211–6.
- Binici, H, Aksogan O, Bakbak D, Kaplan H, Isik B. Sound insulation of fibre reinforced mud brick walls. *Construct Build Mater* 2009;23(2):1035–41.
- Tolles, LE, Krawinkler H. Seismic studies on small-scale models on adobe houses. Stanford: The John A. Blume Earthquake Engineering Center; 1990.