تأثیر نوع خاک از نظر طبقه‌بندی لرزه‌ای بر طرح به‌سازی ساختمان‌های بنایی با روش شاتکریت

محمد امیر اسکندری، پیمان همامی*؛
دانشگاه خوارزمی، گروه عمران

تاریخ: دریافت ۹٤/۱۰/۱۷ **پذیرش** ۹٤/۱۲/۲۲

چکیده

اغلب ساختمان‌های مصالح بنایی در مقابل زلزله آسیب پذیرند و عموماً به به‌سازی و تقویت نیازمند هستند. استفاده از شاتکریت همراه با شبکه‌ای از میلگرد، یکی از روش‌های پرکاربرد برای مقاوم‌سازی دیوارهای ساختمان‌های موجود بنایی است. در این تحقیق، به تأثیر خاک محل از نظر لرزه‌ای، بر این شیوه به‌سازی توجه شده است. به‌این منظور، مدل سه‌بعدی سه ساختمان بنایی با نرم افزار ABAQUS تهیه شده‌است. سپس این مدل‌ها در حالت‌های مبنا (بدون شاتکریت) در مقابل نگاشت زلزله‌های طبس، بم و منجیل که در ایستگاه‌های مستقر بر خاک‌های نوع I (طبق تقسیم‌بندی استاندارد ۲۸۰۰) ثبت شده‌اند تحلیل شده‌اند. همهٔ زلزله‌ها به‌صورت دو مؤلفه‌ای در نظر گرفته شدند و محدودهٔ تمرکز تنش‌ها و نقاط آسیب‌پذیر ساختمان‌ها شناسایی شدند. سپس روش‌های مختلف به‌سازی با شاتکریت (شامل تنوعی از نوارهای عمودی، افقی و مورب با عرض‌های مختلف) در نقاط آسیب‌پذیر در نظر گرفته شدند و تحلیل‌های لرزه‌ای قبلی تکرار شد. بهترین شیوه به‌سازی، افزایش سختی و مقاومت با کمک شاتکریت نوارهای افقی و عمودی اطراف بازشوی دیوارها تشخیص داده شد برای روشن شدن تأثیر نوع خاک بر کارآیی روش به‌سازی، یکی از ساختمان‌ها در مقابل سه رکورد از زلزله طبس که بر ایستگاه‌های مستقر بر خاک‌های نوع I، II و III ثبت شده بودند، تحلیل شد و با مقایسه بین نتایج حاصل از تحلیل مدل‌های تقویت شده و تقویت نشده، نشان داده شد که با تقویت سازه، ضمن افزایش ظرفیت سازه، نیاز لرزه‌ای (برش پایه) افزایش می‌یابد و در ساختمانی

* **نویسنده مسئول** homami@khu.ac.ir

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.5.1.9]

که روی زمین با خاک سخت (نوع I) قرار دارد افزایش نیاز لرزه‌ای بیش‌تر از زمین‌های نرم است. این امر موجب می شود، کارآیی روش به‌سازی در ساختمان‌هایی که روی زمین‌های با خاک سخت قرار دارند، کاهش یابد و توصیه می‌شود روش به‌سازی با شاتکریت به‌صورت محدود و در ترکیب با سایر روش‌ها از جمله پس تنیدگی با کابل و ... که موجب افزایش مقاومت می‌شوند اما سختی را افزایش نمی دهند، به‌کار رود.

واژه‌های کلیدی : به‌سازی لرزه‌ای، شاتکریت، ساختمان‌های بنایی، خاک محل

مقدمه

به‌سازی لرزه‌ای، مجموعه اقداماتی است که سبب بهبود پاسخ لرزه‌ای سازه‌ها می‌شود و برای بهبود پاسخ سازه‌ها، حسب نیاز اقداماتی در جهت افزایش ظرفیت‌های سازه یعنی افزایش سختی، مقاومت یا شکل‌پذیری اعضای سازه در برابر نیروهای لرزه‌ای انجام می‌شود و یا اقداماتی در جهت کاهش نیاز لرزه‌ای با کاهش جرم، جداسازی لرزه‌ای و مانند آن انجام می‌پذیرد. ضرورت انجام به‌سازی لرزه‌ای پس از بررسی و تشخیص آسیب‌پذیری لرزه‌ای روشن می‌شود. در بررسی‌های آسیب‌پذیری، به سطح مشخصی از خطر لرزه‌ای توجه می‌شود و با تحلیل مدل‌های عددی سازه در مقابل آن سطح از بار لرزه‌ای، پاسخ‌های سازه ارزیابی می‌شوند و نیاز لرزه‌ای با ظرفیت سازه مقایسه می‌شود. تعیین نیاز لرزه‌ای به نوع تحلیل و سطح خطر لرزه‌ای وابسته است و خصوصیات تاریخچهٔ بار لرزه‌ای شامل قدرت، مدت و محتوای فرکانسی تکان‌های شدید زمین‌لرزه از مهم‌ترین عواملی هستند که بر پاسخ لرزه‌ای سازه‌ها تأثیر گذارند. به‌طورکلی با بزرگ شدن قدرت و مدت زلزله، پاسخ‌های سازه افزایش می‌یابد اما تأثیر محتوای فرکانسی حرکات زمین بر سازه‌ها بسیار پیچیده است. مجموعه عواملی که انتشار امواج زلزله را از کانون آن تا محل ثبت نگاشت تحت تأثیر قرار میدهند بر محتوای فرکانسی زلزله اثر می‌گذارند. این عوامل شامل نوع گسلش، سازند ساختگاه، توپوگرافی محل و مشخصات مکانیکی و دینامیکی خاک محل هستند. از میان عوامل تأثیرگذار بر محتوای فرکانسی، نوع خاک محل بیش‌تر از از بقیه عوامل مورد توجه قرار گرفته است به‌طوری‌که تأثیر این عامل به‌طور مستقیم در آیین نامه‌ها و

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.5.1.9]

دستورالعمل‌های محاسبه بارهای لرزه‌ای دخالت داده می‌شود و طیف‌های طرح آیین نامه بر اساس نوع خاک محل انتخاب می‌شوند.

هدف این تحقیق، تعیین اثرات مربوط به نوع خاک محل یا محتوای فرکانسی بار لرزه‌ای، بر پاسخ سازه به‌سازی شده و در نتیجه کارآیی روش به‌سازی است. با توجه به این‌که خیلی از سازه‌های مسکونی، مدارس و بناهای فرهنگی موجود در کشور از مصالح بنایی ساخته شده‌اند و آسیب‌پذیری این نوع ساختمان‌ها بر کسی پوشیده نیست، به‌سازی ساختمان‌های بنایی سهم بزرگی در کاهش خسارات و تبعات زلزله دارد و شناسایی و درک رفتار این سازه ها قبل و بعد از زلزله و به‌سازی حائز اهمیت است.

مرور تحقیقات پیشین

تحقیقات مختلفی برای شناخت رفتار لرزه‌ای و نقاط ضعف ساختمان‌های بنای انجام شده است. با توجه به رفتار کاملاً متفاوت آجر و ملات در دیوار و آزمایش‌های متعدد انجام شده روی این گونه سازه‌ها که نمایش‌دهندهٔ پدیده‌هایی مانند لغزش، جداشدگی ملات از آجر و ترک‌های قطری هستند، مدل‌سازی ترک و کاهش سختی ناشی از آن و عمل‌کردهای ناشی از رفتار مکانیکی پیچیده و خاصیت غیرهمگن و شکننده مصالح بنایی همواره از بحث‌های مهم بوده است.

مصالح بنایی از المان‌های یک‌نواختی ساخته شده‌اند که از بالا و پایین با ملات به‌هم پیوسته‌اند. این اتصالات ملاتی ضعیف بوده است و به‌طور چشم‌گیری رفتار غیرخطی از خود نشان می‌دهند. خاصیت غیرخطی اتصالات ملات در ابتدا از تغییر شکل غیرخطی آن‌ها تحت برش یا فشار حاصل می‌شود ولی به‌وسیلهٔ شکست محلی، باز و بسته شدن و لغزش اتصالات تشدید می‌شوند.

بر اساس تحقیقاتی که در گذشته صورت گرفته برای مدل‌سازی ساختار مصالح بنایی دو روی‌کرد ماکرو و میکرو وجود دارد. در روش ماکرو برای مدل‌سازی محیط مصالح بنایی به‌صورت پیوسته در نظر گرفته می‌شود به این معنی که آجرها و ملات و سطح مشترک ملات و

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.5.1.9]

آجر به‌صورت ماده‌ای همگن معادل فرض می‌شود نظیر آن‌چه دهانسکار[1] [۱] و میدلتون[2] [۲] انجام شده است معمولاً این روی‌کرد به‌دلیل ناتوانی در تحلیل جزئیات تنش و در برگیری انواع مکانیسم‌های شکست برای تحلیل ساختار مصالح بزرگ استفاده می‌شود. مدل‌سازی میکرو روی‌کردی محاسباتی متمرکز است و به اطلاعات عوامل بسیار زیادی نیازمند است.

پیج[3] [۳] از اولین افرادی بود که به مدل‌سازی عددی آجر کاری تحت ترکیب نیروهای درون صفحه به‌صورت مدل‌سازی میکرو پرداخت. در مدل وی آجرها رفتار کاملا خطی دارند و رفتار غیرخطی آجرکاری ناشی از رفتار درزهای ملات در نظر گرفته شده است. وی از معیار زوال مور-کولمب برای مدل‌سازی درزهای ملات استفاده کرد.

لطفی و شینگ[4] [٤] در سال ۱۹۹٤ به مدل‌سازی دیوارهای آجری به‌روش میکرو پرداختند. روت[5] و لورنسو[6] [٥] در سال ۱۹۹٦ به ارائهٔ المان تماسی برای مدل‌سازی دیوارهای آجری به روش مدل‌سازی میکرو پرداختند. معیار زوال حاکم در درزهای ملات در این روش مدل‌سازی ترکیبی از معیار زوال مور-کولمب با معیار حداکثر مقاومت کششی به‌همراه یک کلاهک فشاری است. علاوه بر آن یک المان تماسی داخلی برای آجر برای مدل‌سازی شکست کششی و برشی در واحدهای بنایی استفاده شده است. شیمون[7] و همکارانش [٦] (۲۰۰۷) نیز با استفاده از همین روش به مدل‌سازی دیوارهای آجری پرداختند.

گمباروتا[8] [۷] مدل‌سازی میکرو را به‌کار برد که در آن دیوار به‌صورت یک لایه طبقه‌بندی شده از لایه‌های ملات و مصالح تشکیل شده است. چون ساختار مصالح به‌وسیله مجموعه‌های جدا از هم که با اتصالات به‌هم وصل شده، مدل‌سازی شده و این اتصالات به‌کمک المان‌های واضح تعریف شده‌اند بنابراین ملاحظاتی از قبیل شروع شکست، گسترش ترک و لغزش در سطوح مختلف مشاهده شده و آنالیزهای واقعی‌تری به‌دست می‌آید. استفاده از روش میکرو دقت بیش‌تری نسبت به‌روش اول دارد ولی تحقیقات انجام شده در این زمینه نشان می‌دهد که با استفاده از روش ماکرو جواب‌های قابل قبولی به‌دست می‌آید.

تابش پور [۸] با بررسی آسیب‌پذیری لرزه‌ای و مقاوم‌سازی سازه‌های آجری غیرمسلح نقاط ضعف ساختمان‌های بنایی کشور را ارائه کرده است. کاظمی و همکاران [۹]، رفتار لرزه‌ای اتاق

1. Dhanasekar 2. Midelton 3. PAge 4. Shing 5. Rots 6. Lourenco
7. Chaimoon 8. Gambarotta

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.5.1.9]

آجری ساخته شده بر اساس استاندارد ۲۸۰۰ به‌کمک میز لرزان و مدل‌سازی عددی آن را بررسی کرده‌اند. صارمی‌راد [۱۰] روش‌های مختلف به‌سازی سازه‌های بنایی را بررسی کرده است و نشان داده که روش شاتکریت دیوارها عمل‌کرد مطلوبی داشته است. هم‌چنین در FEMA 308 [۱۱] روش‌های به‌سازی سازه‌های بنایی ارائه شده است.

معرفی مدل‌ها و روش بررسی

مدل‌سازی و تحلیل ساختمان سه‌بعدی با مصالح بنایی در مقابل زلزله‌های متعدد با روی‌کرد مدل‌سازی میکرو، بسیار زمان بر و پر هزینه است. هم‌چنین در روش مدل‌سازی میکرو به اطلاعات زیادی نیاز است که اغلب همراه با نمونه‌های آزمایشی مصالح قابل استخراج است. به‌دلیل این محدودیت‌ها، در این مقاله از روی‌کرد ماکرو در نرم‌افزار ABAQUS استفاده شده است و رفتار مجموعه آجر و ملات به‌صورت همگن فرض شده است.

برای بررسی مدل‌ها از نمودارهای برش پایه و دریفت سازه و هم‌چنین کانتور کرنش بیشینه پلاستیک اصلی که بیان‌گر ترک‌خوردگی در سازه است استفاده شده است. المان‌هایی که برای مدل‌سازی استفاده شده‌اند عبارتند از:

۱) المان SOLID 3D برای دیوارهای آجری و سقف

۲) المان SHELL(COMPOSITE) برای شاتکریت

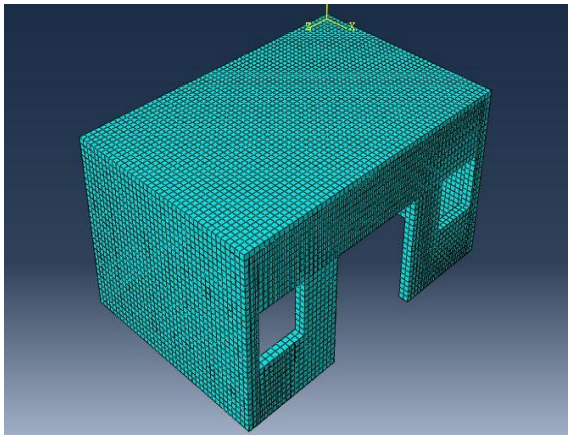
اندازهٔ المان‌ها برابر ۱۰ سانتی‌متر تعریف شد و نوع اتصال بین دیوار و شاتکریت با توجه به آن که در معدود آزمایش‌های انجام گرفته جدایی بین شاتکریت و دیوار رخ نداده است، از نوع TIE در نظر گرفته شده است.

سه ساختمان با طول٦ متر، عرض ٤ متر و ارتفاع ۳ متر در نظر گرفته شده است، ضخامت دیوارها ۲۰ سانتیمتر در نظر گرفته شده است.

مطابق شکل‌های ۲ تا ٤، بازشوهایی در برخی از دیوارها در نظر گرفته شده است. این بازشوها ضوابط استاندارد ۲۸۰۰ را رعایت نکرده‌اند و بنابراین آسیب‌پذیر تلقی می‌شوند. به‌عنوان نمونه در ساختمان شمارهٔ ۱ که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، بازشویی به ارتفاع ۲ متر و عرض ۲ متر به‌عنوان در ورودی و دو پنجره با ارتفاع و عرض ۱ متر در یکی از دیوارها و در دیوار مجاور

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.5.1.9]



شکل ۱. نحوهٔ مش‌بندی مدل

آن نیز بازشو به‌صورت پنجره به‌ارتفاع ۱ متر و عرض ۱ متر که خیلی به‌لبه انتهایی دیوار نزدیک است، تعبیه شده است. جرم حجمی مصالح بنایی ۱۸۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب، مدول الاستیسته مصالح بنایی ۳,۹۸ گیگاپاسکال و ضریب پواسون ۰/۱۵ اختیار شد [۱۲] . دیوار ها از بلوک‌های سفالی حفره‌دار با مقاومت فشاری ۸/۹ مگاپاسکال در راستای موازی و ۳/۷ مگاپاسکال در راستای عمود بر حفرات هستند. جرم حجمی بتن استفاده شده در شاتکریت ۲۳۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب و مدول الاستیسیته بتن ۲۵/۱ گیگاپاسکال و ضریب پواسون ۰/۱۵ برای بتن در نظر گرفته شده است. جرم حجمی مصالح فولادی (آرماتورها) برابر ۷۸۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب، مدول الاستیسیته ۲۱۰ گیگاپاسکال و ضریب پواسون مصالح فولادی ۰/۳ در نظر گرفته شده است. هم‌چنین برای تعریف خصوصیات پلاستیک مصالح بنایی و بتن از مدل رفتاری کنت[1] و پارک[2] در این تحقیق استفاده شده است [۱۲]. ضخامت شاتکریت ۲۵ میلی‌متر و درصد آرماتور شاتکریت ۱ درصد در نظر گرفته شده است.

صحت‌سنجی و بررسی آزمایشگاهی

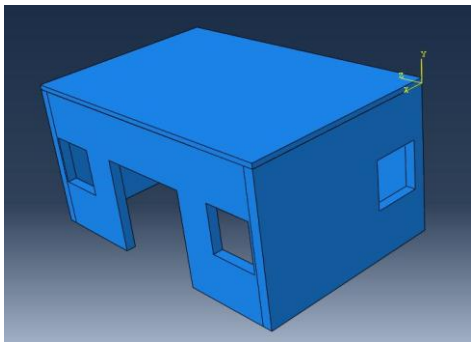
صحت سنجی مدل‌سازی‌های انجام شده در نرم‌افزار ABAQUS که با استفاده از نتایج تحقیق آزمایشگاهی مدل دیوار آجری از مرجع [۱۳] با ابعاد نمایش داده شده و در شکل ۵ بررسی

1.Kent 2. Park

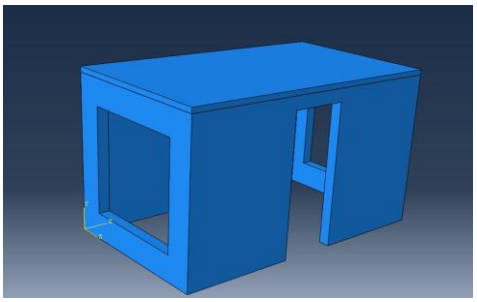
[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.5.1.9]

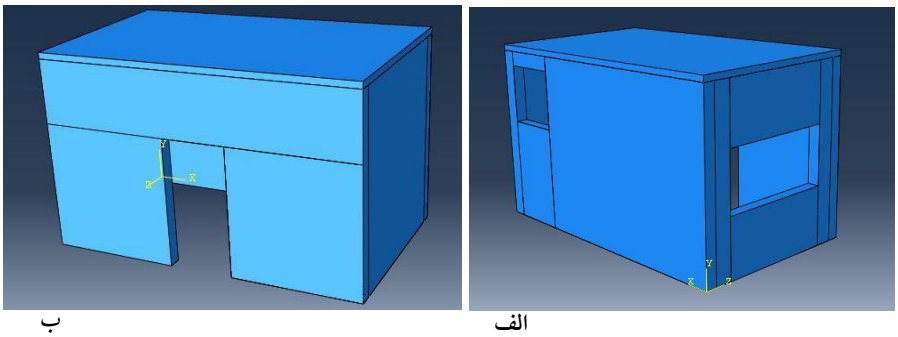
شده است. ضخامت این دیوار یک آجر است و در درزهای افقی و قائم ملات به ضخامت ۱ سانتی‌متر وجود دارد. دیوار مورد نظر از بلوک‌های سفالی حفره‌دار با مقاومت فشاری ۸/۹ و ۳/۷ مگاپاسکال به‌ترتیب در راستای موازی و عمود بر حفره‌هاست.



شکل ۲. ساختمان شمارهٔ ۱ مدل شده در نرم‌افزار ABAQUS



شکل ۳. ساختمان شمارهٔ ۲ مدل شده در نرم افزار ABAQUS

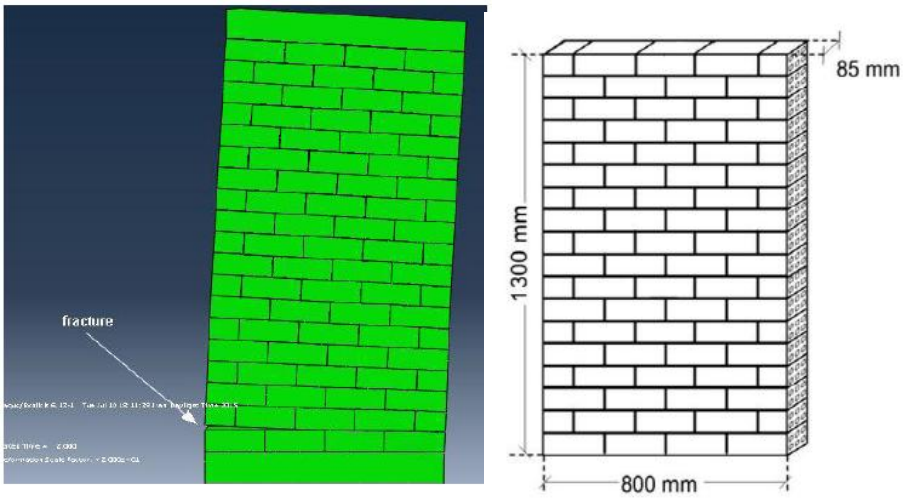


ب الف

شکل ٤. ساختمان شمارهٔ ۳ مدل شده در نرم‌افزارABAQUS ، الف) نمای پنجره هابی بزرگ و نزدیک به لبه دیوار، ب) نمای دیوار با بازشو ورودی

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

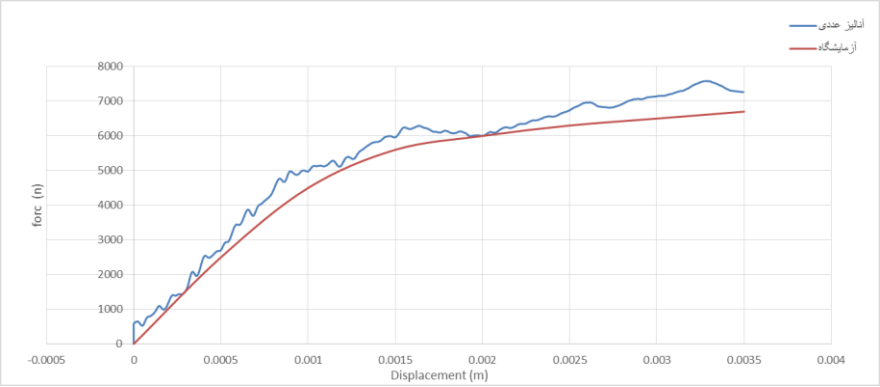
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.5.1.9]



الف ب

شکل۵. پیکربندی مدل استفاده شده برای صحت‌سنجی تحلیل عددی نرم‌افزار، الف) ابعاد مدل آزمایشگاهی [۱۳]، ب) تصویر مدل تهیه شده در نرم‌افزار

در شکل ٦ منحنی بار-تغییرمکان به‌دست آمده از آزمایش‌های مرجع [۱۳] با نتایج تحلیل با نرم‌افزار مقایسه شده‌اند. تطابق نسبی نمودارها، دقت مناسب مدل عددی را نشان می‌دهد.



شکل ٦. نمودار نیرو-تغییر مکان برای صحت‌سنجی مدل عددی

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.5.1.9]

بارگذاری

بار ناشی از وزن مدل به‌صورت گرانشی در راستای قائم (Y) و به سمت پایین به سازه اعمال می‌گردد. برای اعمال بار جانبی پس از برداشت رکورد مربوط به زلزله بم، منجیل و طبس از سایت Peer و مقیاس‌سازی آن به G ۰/۳۵ در نرم‌افزار Seismosignal مؤلفه‌های جابه‌جایی افقی زلزله مذکور به‌صورت هم‌زمان در راستای (X) و (Z) به سازه اعمال شده است.

روش‌های به‌سازی با شاتکریت

در این تحقیق ساختمان‌های بررسی شده در پنج حالت بدون تقویت، تقویت دیوارها با استفاده از شاتکریت کل سطح دیوار در سمت بازشوها، تقویت دیوارها با استفاده از شاتکریت نواری با نوارهای قائم و افقی به عرض ۲۵ و ۵۰ سانتی‌متر ، تقویت سازه با استفاده از نوارهای قائم به عرض ۲۵ سانتی‌متر و تقویت کل سطح دیوارها تحت سه زلزله تحلیل شده‌اند و در انتها برای بررسی تأثیر نوع خاک و محتوای فرکانسی زلزله‌ها بر سازه تقویت شده، نتایج حاصل از تحلیل سازه بر خاک‌های مختلف مقایسه می‌شود.

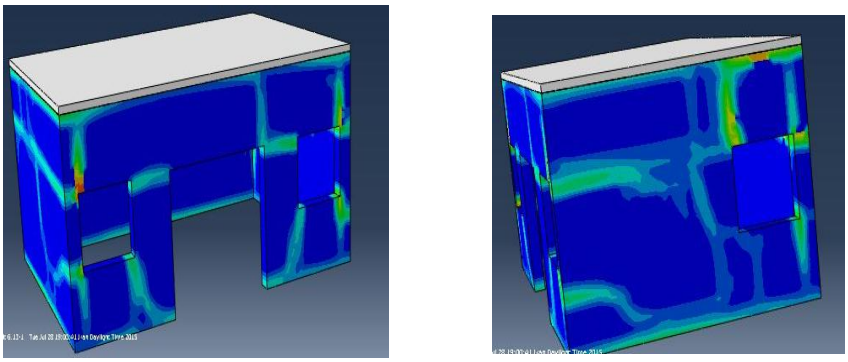
باتوجه به این‌که نتایج به‌دست آمده از هر سه زلزله در کلیات مشابه هستند برای جلوگیری از تکرار و افزایش بیش از حد شکل‌ها برای بررسی ترک‌خوردگی‌های به‌وجود آمده در سازه و تغییرات برش پایه سازه قبل و بعد از تقویت سازه صرفا کانتورهای کرنش و نمودارهای برش پایه مربوط به ساختمان شمارهٔ ۱ در مقابل زلزله طبس (خاک نوع I) نشان داده شده و نمودارهای مربوط به دریفت سازه برای هر سه زلزله ارائه شده است.

بررسی کانتورهای کرنش پلاستیک اصلی بیشینه

کانتور کرنش‌های پلاستیک اصلی بیشینه که نمایان‌گر ترک‌خوردگی در سازه‌اند در سازه تقویت نشده در شکل ۷ نشان داده شده است. چنان‌که ملاحظه می‌شود ترک‌خوردگی‌ها در اطراف بازشوها شدت بیش‌تری داشته است.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

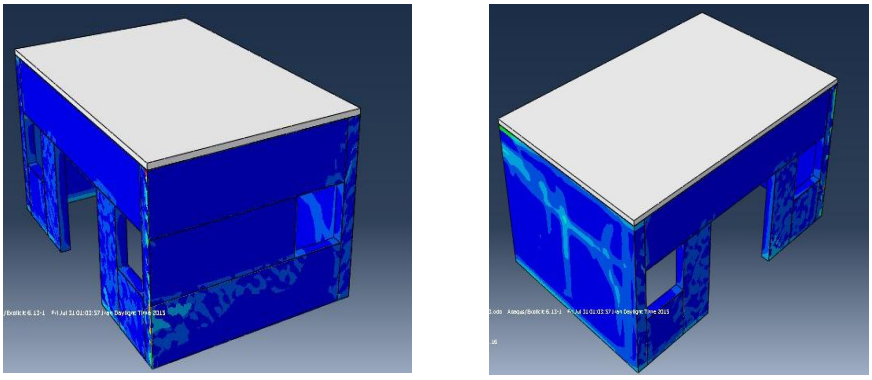
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.5.1.9]



شکل ۷. کانتور کرنش‌های پلاستیک اصلی بیشینه در چهار وجه ساختمان

تقویت سازه با استفاده از شاتکریت کل سطح دیوارهای بازشودار

در شکل ۸ کانتور کرنش‌های پلاستیک اصلی بیشینه سازه پس از تقویت سازه با استفاده از شاتکریت کل سطح دیوارهای بازشو دار ملاحظه می‌شود.



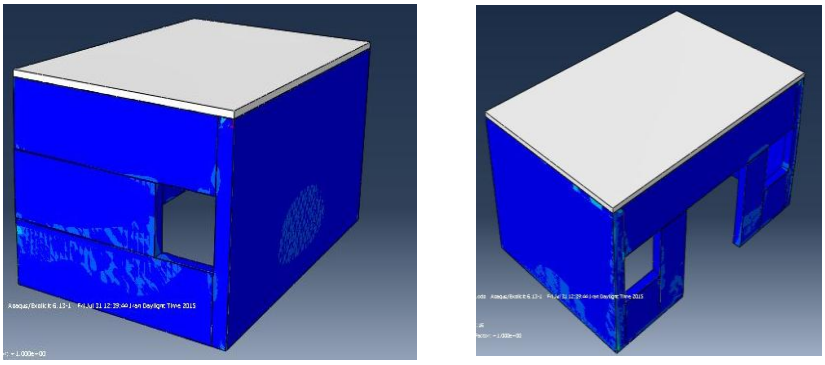
شکل ۸. کانتور کرنش‌های پلاستیک اصلی بیشینه در چهار وجه ساختمان

تقویت سازه با استفاده از شاتکریت کل دیوارها

در این روش تمام سطح دیوارهای دورتادور سازه با استفاده از شاتکریت تقویت شده که در شکل ۹ کانتور کرنش‌های پلاستیک اصلی بیشینه در این روش مشاهده می‌شود.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

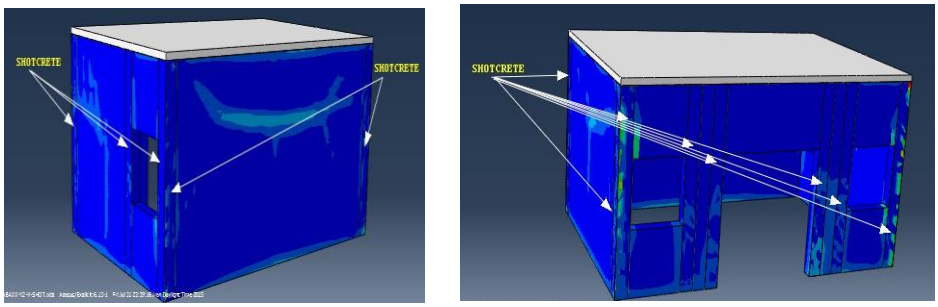
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.5.1.9]



شکل۹. کانتور کرنش‌های پلاستیک اصلی بیشینه در چهار وجه ساختمان

تقویت سازه با استفاده از شاتکریت به‌صورت نوارهای قائم

در این روش برای تقویت سازه از شاتکریت دیوارها با استفاده از نوارهای قائم به عرض ۲۵ سانتی‌متر در اطراف باشوها و محل‌هایی که شدت ترک‌خوردگی‌ها بیش‌تر است استفاده شده است. در شکل ۱۰ کانتورهای کرنش پلاستیک اصلی بیشینه مدل در این روش ملاحظه می‌شود.



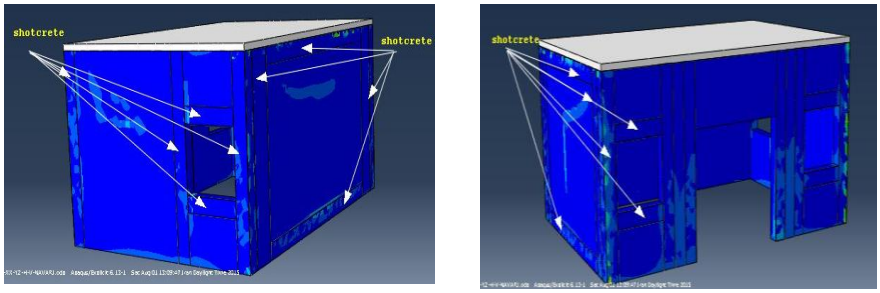
شکل ۱۰. کانتور کرنش‌های پلاستیک اصلی بیشینه در چهار وجه ساختمان

تقویت سازه با استفاده از شاتکریت به‌صورت نوارهای افقی و قائم

در این روش برای تقویت سازه از نوارهای افقی و قائم به عرض ۲۵ سانتی‌متر در اطراف بازشوها و مناطقی که شدت ترک‌خوردگی بیش‌تر بوده استفاده شده است. در شکل ۱۱ کانتور کرنش‌های پلاستیک اصلی بیشینه سازه در این روش ملاحظه می‌شود.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

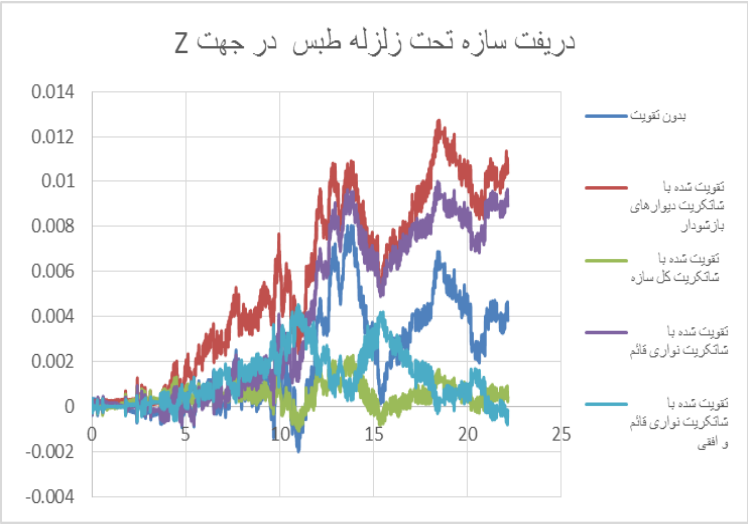
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.5.1.9]



شکل ۱۱. کانتور کرنش‌های پلاستیک اصلی بیشینه در چهار وجه ساختمان

بررسی نمودارهای دریفت سازه

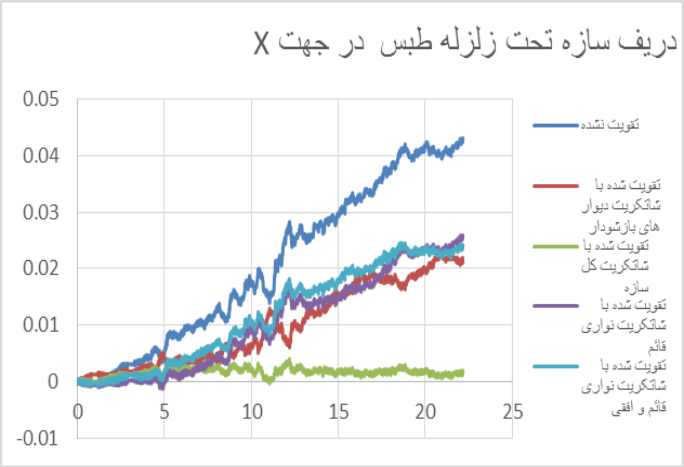
شکل‌های ۱۲ الی ۱٤ نمودارهای دریفت سازه را نشان می‌دهند که با توجه به این نمودارها، می‌توان نتیجه گرفت که دریفت سازه پس از تقویت به‌روش‌های مختلف فوق‌الذکر در جهت X کاهش یافته است ولی در جهت Z فقط در تقویت به‌روش‌های دوم و چهارم موجب کاهش دریفت سازه می‌شود.



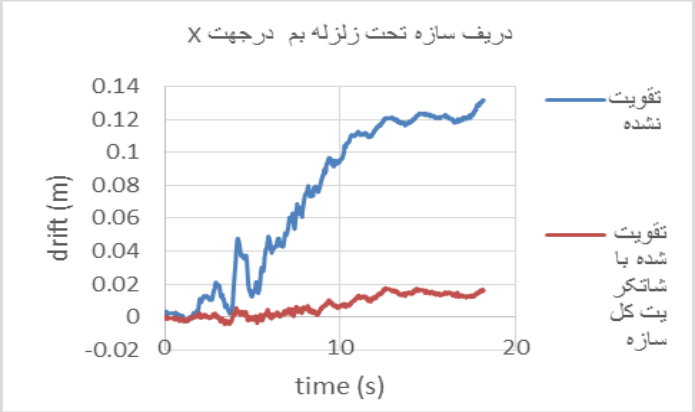
شکل ۱۲. الف) نمودار دریفت سازه تحت زلزله طبس در جهت Z

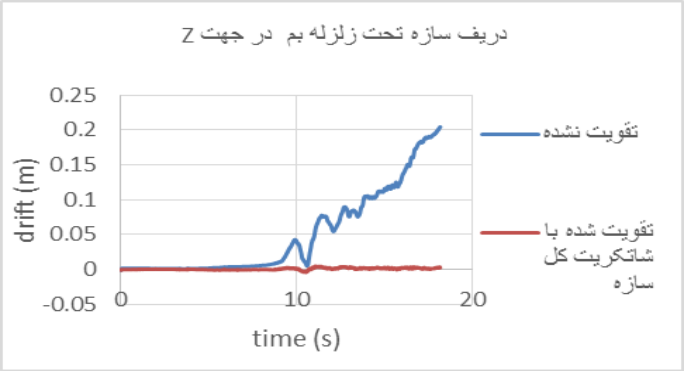
[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.5.1.9]



شکل ۱۲. ب) نمودار دریفت سازه تحت زلزله طبس در جهت X

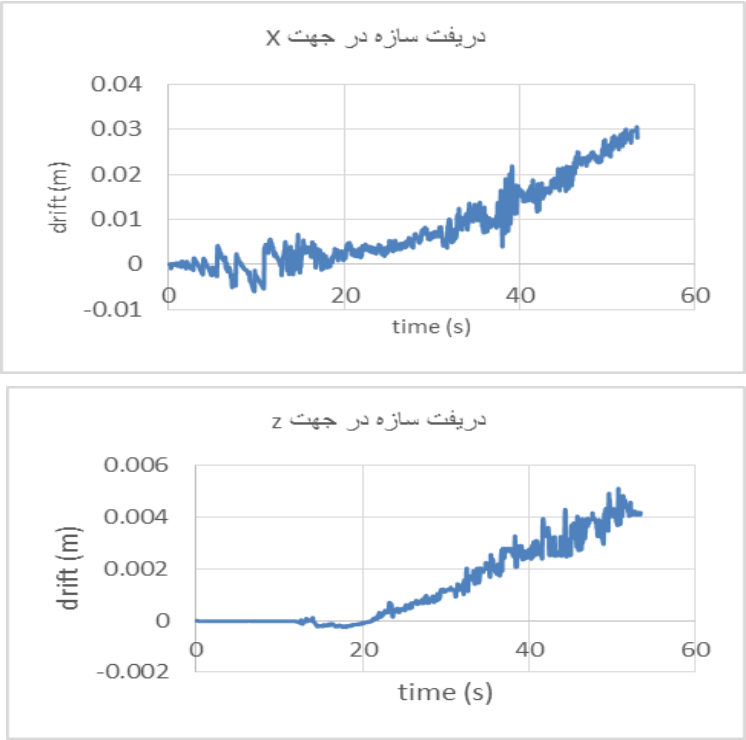




شکل ۱۳. نمودار دریفت سازه تحت زلزله بم

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.5.1.9]



شکل ١٤. نمودار دریفت سازه تحت زلزله منجیل

چنان‌که ملاحظه می‌شود دریفت سازه تحت زلزله طبس در جهت X در هر چهار روش کاهش یافته است که بیش‌ترین کاهش مربوط به زمانی است که کل سازه شاتکریت می‌گردد و در جهت Z پس از شاتکریت سازه به‌روش دوم و چهارم شاهد کاهش دریفت سازه هستیم که باز هم بیش‌ترین کاهش مربوط به زمانی است که کل سازه شاتکریت می‌گردد. از این رو، پس از استفاده از همین روش تقویت و تحلیل سازه تحت زلزله منجیل و بم نیز شاهد بروز همین نتایج هستیم.

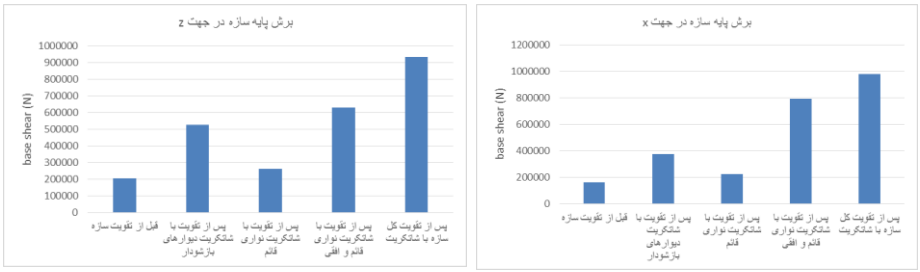
بررسی نمودارهای برش پایه سازه

حداکثر برش پایه سازه در حالت تقویت نشده و تقویت شده به‌روش‌های مختلف که قبلاً معرفی شدند، در شکل ۱۵ درج شده و برای مقایسه ارائه شده‌اند. با توجه به نمودارها ملاحظه

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.5.1.9]

می‌شود شاتکریت دیوار در تمام روش‌ها باعث افزایش برش پایه (یا متناظراً ظرفیت سازه) شده است و بیش‌ترین افزایش ظرفیت مربوط به روش دوم یعنی شاتکریت کل سازه است.



شکل ۱۵. حداکثر برش پایه در جهات اصلی ساختمان شماره ۱ پس از تقویت با روش‌های مختلف

تأثیر نوع خاک در نیاز لرزه‌ای

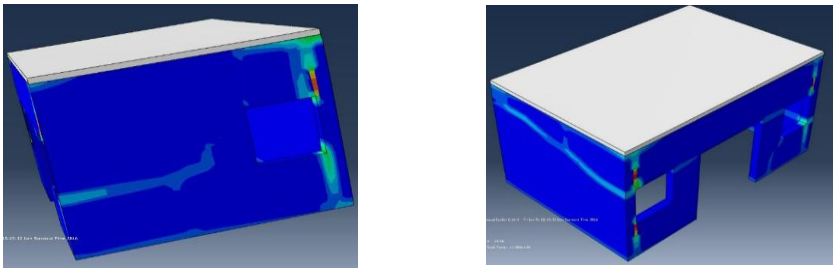
با توجه به این‌که در بخش‌های قبل، سازه تحت رکورد مربوط به زلزله طبس (در ایستگاه طبس) تحلیل و نتایج بررسی شده است، برای مقایسه اثر نوع خاک و کاهش سایر عوامل بر محتوای فرکانسی، از رکوردهای همین زلزله در ایستگاه‌های کاشمر و بجستان که به‌ترتیب روی خاک نوع III و II قرار داشتند و دارای نوع خاک متفاوت نسبت به ایستگاه طبس هستند استفاده می‌شود. یک‌بار سازه بدون تقویت و بعد ازآن سازه تقویت شده با استفاده از شاتکریت نواری در مقابل سه زلزله مذکور تحلیل شده و نتایج در ادامه ارائه شده‌اند.

بررسی کرنش اصلی بیشینه

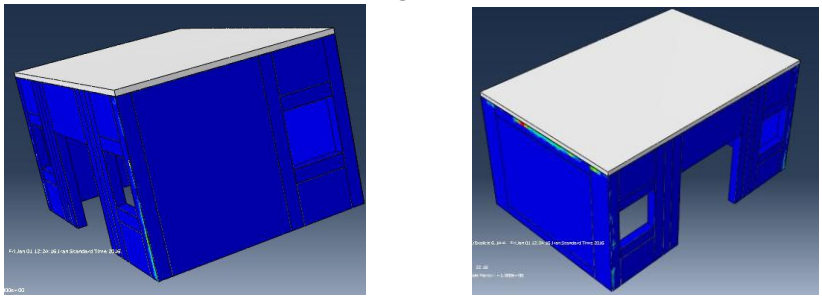
در منحنی‌های کرنش اصلی بیشینه محل تمرکز تنش‌ها با رنگ روشن قابل تشخیص هستند. چنان‌که در تصاویر ۱۶ الی ۱۹ مشاهده می‌شود. تمرکز تنش‌ها در اطراف بازشوها رخ داده است و یا از موقعیت بازشوها تأثیر پذیرفته است.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

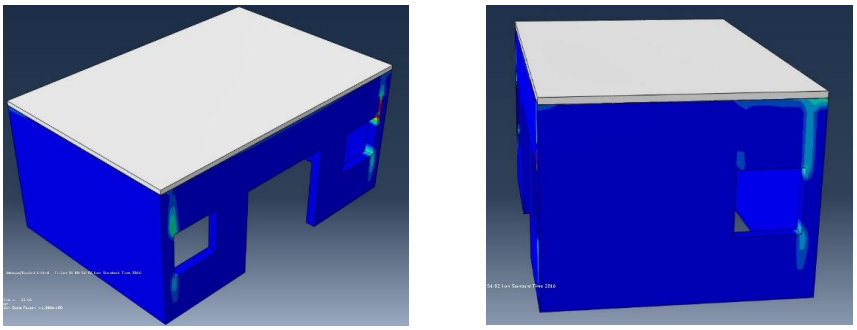
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.5.1.9]



شکل ۱۶. کانتور کرنش‌های پلاستیک اصلی بیشینه قبل از تقویت در مقابل زلزله طبس که در ایستگاه کاشمر(خاک نوعIII) ثبت شده است



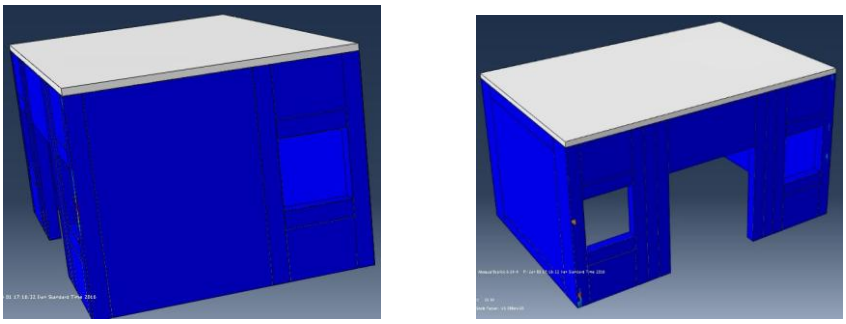
شکل ۱۷. کانتور کرنش‌های پلاستیک اصلی بیشینه بعد از تقویت در مقابل زلزله طبس که در ایستگاه کاشمر(خاک نوعIII) ثبت شده است



شکل ۱۸. کانتور کرنش‌های پلاستیک اصلی بیشینه قبل از تقویت در مقابل زلزله طبس که در ایستگاه بجستان(خاک نوعII) ثبت شده است

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

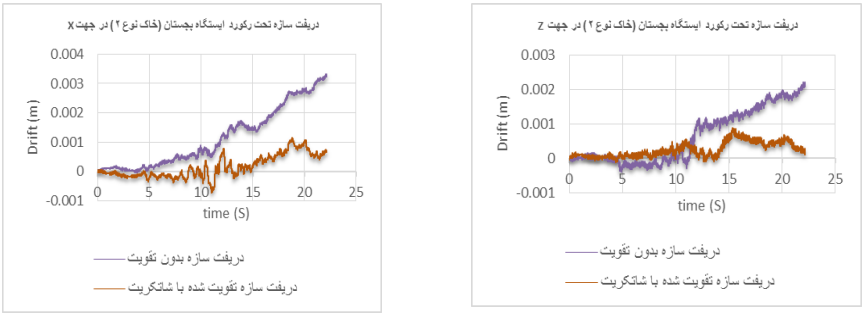
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.5.1.9]



شکل ۱۹. کانتور کرنش‌های پلاستیک اصلی بیشینه بعد از تقویت در مقابل زلزله طبس که در ایستگاه بجستان(خاک نوعII) ثبت شده است

بررسی نمودارهای دریفت سازه

در شکل‌های ۲۰ و ۲۱ نمودارهای جابه‌جایی نسبی در مقابل زمان ترسیم شده‌اند و تأثیر روش به‌سازی را در کاهش دریفت نشان می‌دهند.



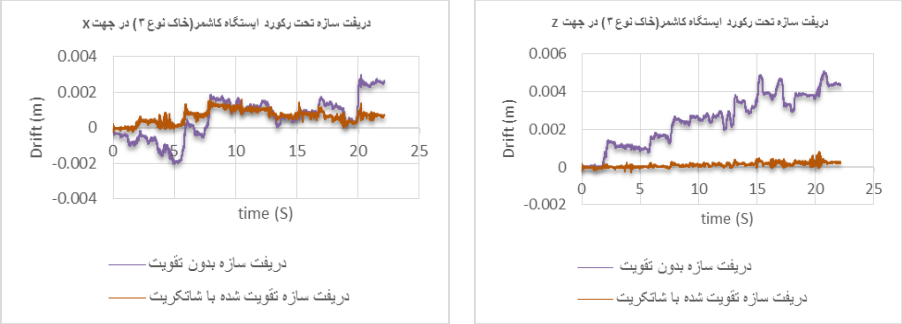
شکل ۲۰. دریف سازه تحت رکورد ایستگاه بجستان (خاک نوع II)

بررسی نمودارهای برش پایه سازه

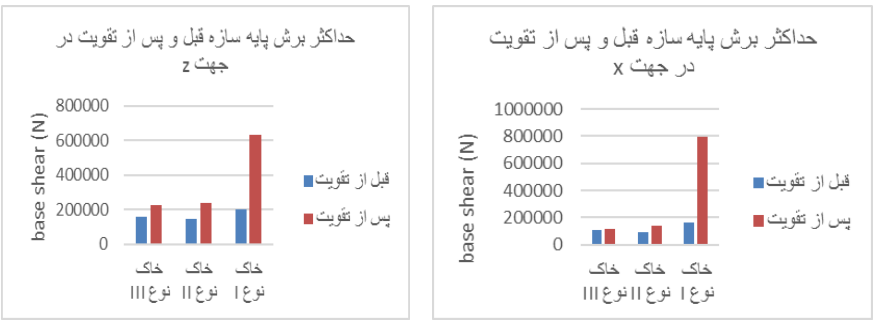
در بخش‌های قبل نشان داده شد که روش شاتکریت تأثیر مطلوبی در افزایش سختی و کاهش نیاز لرزه‌ای تغییر مکان ساختمان بنایی به‌سازی شده در مقابل زلزله‌های رخ داده در خاک‌های مختلف را نشان داده است. اما افزایش سختی ساختمان پس از به‌سازی موجب افزایش نیاز مقاومتی ساختمان نیز می‌شود. در شکل ۲۲ افزایش برش پایه در ساختمان به‌سازی شده در مقایسه با ساختمان به‌سازی نشده، ارائه شده است.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.5.1.9]



شکل ۲۱. دریف سازه تحت رکورد ایستگاه کاشمر (خاک نوع III)



شکل ۲۲. حداکثر برش پایه در جهات اصلی ساختمان شمارهٔ ۱ در مقابل زلزله‌های ثبت شده روی خاک‌های مختلف

نتیجه‌گیری

با بررسی نمودار دریفت سازه در حالت‌های مختلف بدون تقویت و تقویت شده و هم‌چنین مقایسهٔ کانتور کرنش‌های اصلی پلاستیک بیشینه و نمودار برش پایه در حالت‌های مختلف می‌توان پی برد که:

۱. استفاده از شاتکریت در تمام حالت‌های بررسی شده، قادر است سختی و مقاومت برشی دیوارها را آن‌چنان افزایش دهد که از تخریب زودهنگام دیوار جلوگیری کند. با کمک شاتکریت نواری دریفت ساختمان حداقل ۵۰٪ کاهش یافته است. هم‌چنین شاتکریت باعث توزیع پراکندگی ترک‌ها و کاهش شدت آن‌ها شده است. تنش در دیوارهای تقویت

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.5.1.9]

شده یک‌نواخت‌تر و با شدت ٤٠٪ کم‌تر از حالت بدون تقویت ظاهر شده است. این نتیجه با تحقیقات انجام شده در مرجع [۱۰] تطابق دارد.

۲. بهترین نتیجه به‌سازی با شاتکریت کل دیوارها به‌دست نمی‌آید بلکه با استفاده از شاتکریت نواری می‌توان علاوه بر مقاوم‌سازی مطلوب دیوارها، صرفه جویی اقتصادی چشم‌گیری فراهم کرد.

۳. تحلیل سازه قبل و پس از تقویت با شاتکریت بر خاک های نوع I ، II، III نشان‌دهندهٔ آن است که افزایش مناسب سختی در ساختمان مستقر روی خاک‌های نوع II و III موجب شده است که برش پایه نیاز طرح، به مقدار ناچیزی افزایش یابد و در عین حال نیاز لرزه‌ای دریفت کاهش پیدا کند. اما در ساختمان مستقر بر خاک نوع I، افزایش نیاز لرزه‌ای مقاومت (برش پایه) حدود ٤ برابر حالت بدون تقویت شده است (در خاک نوع II و خاک نوع III حدود ۲۵٪ افزایش برش پایه رخ داده است) و اگر چه به‌کمک شاتکریت، مقاومت سازه افزایش می‌یابد اما به‌دلیل افزایش چشم‌گیر نیاز لرزه‌ای، احتمال خرابی نیز افزایش خواهد یافت و خصوصاً مسائل اجرایی از قبیل کیفیت اجرای مقاوم‌سازی نقش تعیین‌کننده خواهد داشت.

٤. با توجه به توضیحات بند یاد شده، در زمین‌های سخت (نوع I) برای جلوگیری از افزایش نیاز مقاومتی سازه، توصیه می‌شود روش به‌سازی با شاتکریت به‌صورت محدود و در ترکیب با سایر روش‌ها از جمله پس‌تنیدگی با کابل و ... به‌کار رود که موجب افزایش مقاومت می‌شوند اما سختی را افزایش نمی دهند.

منابع

1. Dhanasekar M., Kleeman P.W., Page A.W., "Biaxial Stress-Strain Relations for Brick Masonry", Journal of Structural Engineering, ASCE, 111 (5) 1085-1100.

2. Middleton J., Pande G.N., Liang J.X., Kralj B., "Some Recent Advances in Computer Methodsin Structural Masonry", Computer Methods in Structural Masonry, J.Middleton and G.N.Pande,eds., Booksand Journals International,Swansea,U.K, 1-21.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.5.1.9]

3. Page A.W., "Finite element model for masonry", Journal of the Structural Division, ASCE, ST8 (1978) 1267-1285.

4. Lotfi H.R., "Interface model applied to fracture of masonry structures", Journal of Structural Engineering, ASCE (1994) 63-80.

5. Lourenco B.P., Rots J.G., "Multisurface interface model for analysis of masonry structures", Journal of structural Engineering, ASCE (1997) 660-668.

6. Chaimoon K., Attard M.M., "Modeling of unreinforced masonry walls under shear and compression", Engineering structures (2007) 2056-2068.

7. Gambarotta L., Lagomarsino S., "Damage Models for the Seismic Response of Brick Masonry Shear Walls.Part II:The Continuum Model and its Applications", Earthguake Eng.and Structural Dynamics, 441-462.

۸. تابش پور محمدرضا، *مطالعه آسیب پذیری لرزه‌ای و مقاوم‌سازی سازه‌های آجری غیرمسلح*، اولین همایش بین‌المللی مقاوم‌سازی لرزه‌ای (۱۳۸۵).

۹. کاظمی محمدتقی، حسین‌زاده اصل مسعود، *بررسی رفتار لرزه‌ای اتاق آجری ساخته شده بر اساس استاندارد ۲۸۰۰ به‌کمک میز لرزان و مدل‌سازی عددی آن*، هفتمین کنفرانس بین‌المللی مهندسی عمران، تهران.

۱۰. صارمی‌راد، فرامرز، *به‌سازی و مقاوم سازی ساختمان‌ها در برابر زلزله*، انتشارات دهخدا (۱۳۸٤).

11. Fderal Emergency Management Agency; (1999) ; Repair of erthquak damaged concrete and masonary wall building-, FEMA 308.

۱۲. نجفقلی‌پورحقیقی محمدامیر، ماهری محمدرضا، *روشی برای مدل‌سازی دیوار برشی آجری با استفاده از نرم افزار* ANSYS ، چهارمین کنگره مهندسی عمران دانشگاه تهران، اردیبهشت (۱۳۸۷).

۱۳. شهبازی رضا، یکرنگ‌نیا محمد، *راهنمای کاربردی ABAQUS به همراه مسائل مهندسی عمران سازه – ژئوتکنیک*، تهران، نشر علم عمران، بهار (۱۳۹۳).

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.5.1.9]