



مهندسی ساختمان و علوم مسکن
دوره چهاردهم، شماره ۳، شماره پیاپی ۲۸
پاییز ۱۴۰۰



صاحب امتیاز: مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی
مدیر مسؤول: دکتر محمد شکرچی زاده
سر دبیر: دکتر شهرام دلفانی
مدیر اجرایی: معصومه جدی

طراح جلد: فاطمه صادقی طباطبایی زواره

هیأت تحریریه:

دکتر عطا آقایی آرای، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی
دکتر سعید بختیاری، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی
دکتر علی بیت‌اللهی، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی
دکتر عباسعلی تسنیمی، دانشگاه تربیت مدرس
دکتر محمدرضا حافظی، دانشگاه شهید بهشتی
دکتر شهرام دلفانی، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی
دکتر غزال راهب، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی
دکتر مهدی زارع، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله
دکتر جعفر سبحانی، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی
دکتر محسنعلی شایانفر، دانشکده عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران
دکتر محمد شکرچی زاده، دانشگاه تهران
دکتر فرهنگ فرحبد، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی
دکتر فرزین کلانتری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
دکتر بهروز محمدکاری، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی
دکتر علی مرادی، مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران
دکتر علی مزروعی، دانشکده عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران مرکزی
دکتر مهدی معرفت، دانشگاه تربیت مدرس
دکتر سیدرسول میرقادری، دانشکده عمران، دانشگاه تهران
دکتر سهراب ویسه، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی

لیتوگرافی، چاپ و صحافی:

چاپخانه مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی

مهندسی ساختمان و علوم مسکن
مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی
وابسته به وزارت راه و شهرسازی

تهران، بزرگراه شیخ فضل‌ا... نوری، فاز ۲ شهرک فرهنگیان، خیابان
نارگل، خیابان شهید علی مروی، خیابان حکمت
صندوق پستی: ۱۶۹۶-۱۳۱۴۵
تلفن: ۶-۸۸۲۵۵۹۴۲، دورنگار: ۸۸۲۵۵۹۴۱
وب سایت: <http://behs.bhrc.ac.ir>
پست الکترونیک: behs@bhrc.ac.ir

فهرست مقالات

- تلفیق رویکردهای مختلف مطالعاتی جهت ریز پهنه‌بندی ژئوتکنیک لرزه‌ای شهر مهدیشهر- مطالعه موردی / سعید هاشمی طباطبایی، سیدمحمود فاطمی‌عقدا، عطا آقایی‌آرایی^{*}، عباس قلندرزاده، مرتضی طالبیان، اشکان محمدی، امیرسعید سلامت، خلیل رضایی، احمدرضا قدرتی‌قراانی..... ۱
- بررسی آجر نمای انعطاف‌پذیر / سهراب ویسه^{*}، علی‌اکبر یوسفی، شروین احمدی..... ۱۳
- مقایسه بررسی آزمایشگاهی و عددی دیوار برشی فولادی با ورق جان صاف، با ورق جان موجدار عمودی با زاویه ۴۵ درجه / سیده‌مریم دشتی‌زند^{*}، وحیدرضا کلات‌جاری، نادر خواجه‌احمد عطاری..... ۱۹
- فرکانس غالب ساختگاه بر اساس نسبت طیفی مؤلفه افقی به عمودی زمین‌لرزه‌های ایران با استفاده از شتاب‌نگارها / عطیه اسحاقی^{*}، محمد شاهوار، اسماعیل فرزندگان، حسین عبداللهمی..... ۲۹
- بررسی و شناخت اجرای نمای خشک و تأثیر آن روی ساختمان‌های بلند مرتبه / سعید بهرامی^{*}، مهناز رضایی، رضا محبی..... ۳۷
- تحلیل رفتار سازه‌ای سیستم مهاربند فولادی همگرای y شکل / سهیل مجیدزمانی^{*}..... ۴۷



تلفیق رویکردهای مختلف مطالعاتی جهت ریز پهنه‌بندی ژئوتکنیک لرزه‌ای شهر مهدیشهر - مطالعه موردی

سعید هاشمی طباطبایی^۱، سید محمود فاطمی عقدا^۲، عطا آقایی آرای^{۳*}، عباس قلندرزاده^۴، مرتضی طالبیان^۵، اشکان محمدی^۶، امیرسعید سلامت^۷، خلیل رضایی^۸، احمد رضا قدرتی قزائی^۹

۱، ۲، ۳، ۴، ۵، ۶، ۷، ۸، ۹. مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی

۸، ۲. دانشگاه خوارزمی، دانشکده علوم

۴. دانشگاه تهران، دانشکده مهندسی

۵. سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور

* تهران، بزرگراه شیخ فضل‌الله نوری، فاز ۲ شهرک فرهنگیان، خیابان نارگل، خیابان شهید علی مروی، خیابان حکمت

E-mail: aghaeiaraei@bhrc.ac.ir، ۱۳۱۴۵-۱۶۹۶، صندوق پستی:

چکیده

مطالعات ریز پهنه‌بندی ژئوتکنیک لرزه‌ای شهر مهدیشهر واقع در استان سمنان، بر اساس بررسی‌های لرزه‌زمین‌ساخت، ژئوالکتریک، ژئوسایسمیک ژئوتکنیک و در نهایت، تحلیل پاسخ ساختگاه انجام شد. بر اساس مطالعات لرزه‌زمین‌ساخت، به دلیل قرارگیری شهر بر روی سرچشمه لرزه‌زا، گستره شهر کم و بیش شتاب و طیف پاسخ یکنواختی دارد. بر اساس داده‌های ژئوالکتریک، قسمت‌های سطحی زمین، پوشیده از رسوبات درشت‌دانه با مقاومت الکتریکی متوسط بوده که با افزایش عمق، ریزدانه‌تر شده و ضخامت قابل‌توجهی نشان می‌دهند. به منظور تعیین ویژگی‌های لایه‌های زیر سطحی مهدیشهر، مطالعات ژئوسایسمیک انجام شد. بر اساس استاندارد ۲۸۰۰ و با توجه به مقادیر سرعت موج برشی و عمق سنگ بستر لرزه‌ای، گستره مورد مطالعه در گروه I و II قرار می‌گیرد. در ادامه، بررسی‌های ژئوتکنیک در قالب بررسی‌های سطحی و زیرسطحی انجام شد. جنس غالب خاک در گمانه‌ها (SW) است. همچنین، با تلفیق نتایج، تعداد ۲۴ گمانه شبیه‌سازی گردید. مطالعات تحلیل پاسخ ساختگاه با استفاده از کلیه نتایج شناسایی‌های ژئوفیزیکی و ژئوتکنیکی و تحلیل احتمالاتی خطر زلزله انجام شد. نتایج در قالب مقادیر شتاب حداکثر افقی، ضریب بزرگنمایی، پی‌یود طبیعی خاک، و سرعت‌های طیفی برای هر سه سطح زلزله‌های با دوره‌های بازگشت ۷۵ سال، ۴۷۵ سال و ۲۴۷۵ سال تهیه و ارائه گردید. به منظور تسهیل در امر طراحی سازه‌های مختلف در مهدیشهر و با توجه به خصوصیات طیف‌های طراحی محاسبه، محدوده مورد مطالعه به سه ناحیه کلی تقسیم و طیف استاندارد طراحی ارائه شد.

کلیدواژگان

ریز پهنه‌بندی، لرزه‌ای، اثرهای ساختگاهی، پارامترهای حرکت، طیف طراحی

Geotechnical Seismic Microzonation Studies of Mehdishahr City- Case Study

S. H. Tabatabaei¹, S. M. Fatemi Aghda², A. Aghaei Araei^{3*}, A. Ghalandarzadeh⁴,
M. Talebian⁵, A. Mohammadi⁶, A. S. Salamat⁷, Kh. Rezaei⁸, A. R. Ghodrati Ghazaani⁹

1, 3, 6, 7, 9. Road, Housing, and Urban Development Research Center (BHRC), Tehran, Iran

2, 8. Faculty of Science, University of Kharazmi

4. College of Engineering, University of Tehran

5. Geological Survey of Iran

* P.O. Box 13145-1696, Tehran, Iran, E-mail: aghaeiaraei@bhrc.ac.ir

Abstract

Seismic geotechnical microzonation studies of Mehdishahr city located in the Semnan province were conducted based on seismotectonic, geoelectric, geoseismic, geotechnical and site response analysis. Based on the seismotectonic studies, Mehdishahr city has been located on the seismic source. The town has nearly uniform acceleration and response spectrum. Based on geoelectrical data surficial ground layers were covered with coarse grained calcareous deposits with medium electrical resistance. In order to determine the subsurface specifications, geoseismic studies were carried out using seismic refraction and down hole methods. Based on the obtained results from average shear wave velocity and depths of seismic bed rock, Mehdishahr city has been located on the soil types I and II according to the standard 2800. In order to complete the investigation and further understanding of the soil type up to the depth of seismic bed rock, geotechnical studies were carried out. Based on the laboratory results most prominent soil is SW. Using other results of subsurface investigations, numbers of 24 boreholes were simulated. Site response analysis was carried out using results from geophysical, geotechnical and probabilistic earthquake hazard analysis in Mehdishahr city. Ground motion parameters such as PGA, amplification factor, natural period and velocity response spectra were calculated at ground surface levels. Distribution of these parameters as microzonation maps, were prepared for the earthquakes with return periods of 75, 475 and 2475 years. Finally, for engineering purposes, Mehdishahr area was divided in to three seismic zones, and for each considered seismic zones, standard design spectra were introduced.

Keywords

Microzonation, Earthquake, Site Effects, Motion Parameters, Design Spectrum

۱- مقدمه

حوادث طبیعی همیشه به عنوان یک خطر جدی برای توسعه به شمار رفته و خواهند رفت. از میان حوادث طبیعی، زلزله را می توان به عنوان یکی از مخرب ترین پدیده ها به جهت حجم خسارت های مرتبط با وقوع آن در نظر گرفت. یکی از عمده ترین فعالیت ها در راستای کاهش خطرهای ناشی از زلزله و افزایش ایمنی عمومی، مطالعات ریز پهنه بندی ژئوتکنیک لرزه ای در مناطق شهری است. در این بررسی ها، شناخت اثرهای ساختگاهی و ارائه پارامترهای حرکت زمین به عنوان داده های ورودی جهت تحلیل لرزه ای سازه ها که از یک روش علمی و دقیق به دست آمده باشد، در اولویت بسیار بالایی قرار دارد. بر اساس بررسی زلزله های اخیر می توان مناطق آسیب دیده را بر حسب میزان آسیب دیدگی به طور مشخص تقسیم بندی نمود. توزیع نامنظم شدت حرکت های زمین باعث شده است که برخی محققان در ارزیابی آسیب پذیری ساختمان ها بر اثر زلزله، شرایط خاک محل را در درجه اول اهمیت قرار دهند [۱]. از آنجا که آگاهی از شرایط ساختگاهی می تواند ما را به شناخت هر چه بیشتر از خصوصیات زمین لرزه ها و اثرهای زمین شناسی آن رهنمون سازد، لذا در انجام دادن مطالعات ریز پهنه بندی لرزه ای شهرها، ویژگی رفتاری مناطق مستعد لرزه ای بایستی هنگام طراحی سازه ای جدید یا بهسازی سازه های موجود مد نظر قرار گیرد [۲]. با توجه به این که شرایط محلی و در مقیاس محدودتر، توپوگرافی نامنظم سطحی می تواند دامنه، مقدار فرکانس و مدت زمان حرکت زمین را به طور قابل ملاحظه ای تحت تأثیر قرار دهد، لذا این عوامل تأثیر حیاتی در شدت خسارت های ناشی از بروز زلزله دارد [۳].

مطالعات ریز پهنه بندی ژئوتکنیک لرزه ای بیشتر به عنوان قابل قبول ترین ابزار جهت ارزیابی خطرهای لرزه ای و خطرپذیری شناخته شده بر اساس ویژگی های جنبش نیروی زمین با احتساب منبع و شرایط ساختگاه تعریف می شود [۴]. گام نخست در انجام دادن مطالعات ریز پهنه بندی ژئوتکنیک لرزه ای، بررسی لرزه زمین ساخت با هدف برآورد خطر زمین لرزه و ارزیابی منطقی پارامترهای جنبش زمین (بیشینه شتاب، بیشینه سرعت، شدت و غیره) در ساختگاه مورد نظر، بر اثر این رویداد در چشمه های بالقوه زمین لرزه در مدت زمان معین (عمر مفید سازه) است. در بسیاری از پروژه های مهندسی و عمرانی، مطالعات ژئوفیزیکی اهمیت روزافزونی یافته است.

در این بررسی نیز با نگاهی با محوریت توسعه پایدار، بخشی از مطالعات به بررسی های ژئوفیزیکی در قالب ژئوسایسمیک و ژئوالکتریک اختصاص داده شده است (بیت اللهی، ۱۳۸۲). امروزه به منظور ارائه تحلیل کامل تری از خطر زمین لرزه، پارامتر شتاب طیفی دامنه جنبش زمین در طیف پاسخ متناسب با نوع سازه، به عنوان معیار کمی جنبش زمین مورد استفاده قرار می گیرد. در این میان، مطالعات ژئوتکنیکی به منظور شناخت ویژگی های رفتاری مصالح زمین شناسی مهندسی به عنوان داده های پایه جهت انجام دادن ریز پهنه بندی ژئوتکنیک لرزه ای حائز اهمیت است. این مطالعات شامل بررسی های سطحی و زیرسطحی در قالب چاهک های آزمایشی، حفر گمانه های ماشینی با مغزه گیری ممتد، انجام دادن آزمایش های صحرایی و آزمایشگاهی است [۵]. مرحله نهایی ریز پهنه بندی ژئوتکنیک لرزه ای شهری، تحلیل اثرهای ساختگاهی است (هاشمی طباطبایی و همکاران، ۱۳۸۵؛ هاشمی طباطبایی و همکاران، ۱۳۸۷). نتایج این تحلیل ها به صورت پارامترهای حرکت زمین، ضریب تشدید و نیز پارامتر طیف های

پاسخ در نقاط مختلف و در سطح زمین ارائه می شود [۶، ۷، ۴]. انجام دادن این تحلیل ها باید با تعیین مشخصات ژئوتکنیکی لایه های سطحی زمین همراه باشد [۸]. تحقیق حاضر مربوط به مطالعات ریز پهنه بندی ژئوتکنیک لرزه ای در قالب بررسی های زمین شناسی ساختمانی و لرزه زمین ساخت، ژئوالکتریک، ژئوسایسمیک (لرزه شکست مرزی و درون چاهی)، زمین شناسی مهندسی و ژئوتکنیک و در نهایت تحلیل پاسخ ساختگاه به منظور ریز پهنه بندی ژئوتکنیک لرزه ای شهر مهدیشهر در استان سمنان به مساحت تقریبی ۹ کیلومترمربع است.

۲- روش مطالعات ریز پهنه بندی ژئوتکنیک لرزه ای شهر مهدیشهر
مراحل مختلف این مطالعات به دقت مورد نیاز بستگی دارد. بررسی اثرهای ساختگاهی با توجه به اهداف مورد نظر در سه سطح کم، متوسط و زیاد مورد بررسی قرار می گیرد:

- روش های با دقت پایین (دقت رده I)،
- روش های با دقت متوسط (دقت رده II)،
- روش های با دقت بالا (دقت رده III).

در شهر مهدیشهر، مطالعات به دلیل هزینه سنگین، بر اساس دقت متوسط تا زیاد صورت گرفت. هدف از اجرای ریز پهنه بندی با دقت متوسط تا زیاد، ارزیابی و شناخت پدیده های مختلف مرتبط با زمین لرزه در شهرها است. نتایج مطالعات شامل: نقشه های پهنه بندی پارامترهای حرکتی زمین، نظیر شتاب افقی، قائم، شتاب طیفی و نیز نقشه های پهنه بندی پیروید غالب خاک است. با استفاده از نتایج حاصل، می توان به ساخت و ساز ایمن تر در زمان وقوع زلزله دست یافت.

مراحل انجام دادن مطالعات ریز پهنه بندی لرزه ای مهدیشهر عبارتند از:

- مطالعات لرزه زمین ساخت و تحلیل خطر زلزله به منظور تعیین احتمالاتی و قطعی پارامترهای حرکتی زلزله محتمل در نقاط مختلف شهر،
- مطالعات زمین شناسی مهندسی و ژئوتکنیک جهت تعیین نوع رسوبات سطحی، عمق سنگ بستر و مشخصات دینامیکی رسوبات در پهنه شهر با استفاده از شناسایی های ژئوفیزیکی و ژئوتکنیکی،
- تعیین ویژگی های حرکتی و تحلیل پاسخ ساختگاه.

۲-۱- بررسی های لرزه زمین ساخت و تحلیل خطر

گستره مهدیشهر در مجاورت سیستم گسله های دامنه جنوبی البرز که دشت سمنان را از کوهستان البرز جدا می نمایند قرار دارد. این رشته کوه از نظر لرزه خیزی یکی از مناطق فعال در کمربند لرزه خیز آلپ- هیمالایا محسوب می شود. کوتاه شدگی در این پهنه ناشی از همگرایی مایل صفحه عربی و اوراسیا است. این فرایند موجب فعالیت دو سیستم گسله راندگی و راستا لغز شده است. گسله های راندگی بیشتر در دو سوی رشته کوه قرار دارد و البرز را از پهنه ایران مرکزی در جنوب و حوزه خزر را از شمال جدا می نماید. سیستم گسله های راستا لغز چپ گرد در بخش میانی این رشته کوه قرار گرفته و لرزه زاترین گسله های البرز را شامل می شود. امروزه برآورد خطر زمین لرزه بر اساس داده های دراز مدت زمین شناسی در ترکیب با

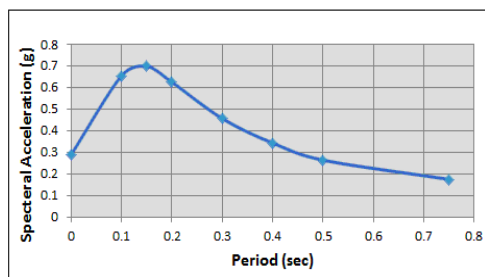


Fig. 1 Maximum ground motion acceleration of response spectra for return period of 475 years in Mahdishahr area

شکل ۱ طیف پاسخ بیشینه شتاب حرکت زمین (g) برای دوره‌های بازگشت ۴۷۵ ساله در محدوده شهر مهدیشهر

۲-۲- مطالعات ژئوفیزیکی

تفسیر داده‌های ژئوفیزیکی به‌طور کلی با توجه به دید و نگرش بر گستره وسیع‌تر از محدوده‌های برداشت شده انجام می‌پذیرد. مطالعات ژئوفیزیکی به منظور کاوش‌های عمیق‌تر ساختگاه موردنظر، در قالب بررسی‌های ژئوالکتریک و ژئوسایسمیک (لرزه شکست مرزی و درون چاهی) انجام شد.

۲-۲-۱- بررسی‌های ژئوالکتریک

مطالعات ژئوالکتریک مهدیشهر به منظور کاوش‌های عمیق‌تر از بررسی‌های سایشیمی و ژئوتکنیکی جهت آشکارسازی روند گسل‌های نهان، سنگ کف زمین‌شناسی، وضعیت نهشته‌های آبرفتی تا عمق تجسس ژئوالکتریک، وضعیت آبخوان، پهنه‌های کم مقاومت و پر مقاومت، جانمایی لنزهای ریزدانه و درشت‌دانه در نهشته‌های سطحی، تغییرات توپوگرافی لایه‌ها و در نهایت بررسی توزیع مقاومت الکتریکی در افق‌های عمقی متفاوت انجام شد. این مطالعات با روش سونداژ الکتریکی قائم با آرایه شلومبرگر در طول ۶ پروفیل و در ۵۰ نقطه سونداژ انجام گرفت. طراحی این مطالعات براساس پیش دانسته‌هایی از خصلت آبرفت‌های گستره بر مبنای بازدیدهای به عمل آمده و در نهایت، بررسی توزیع مقاومت الکتریکی در افق‌های عمقی متفاوت انجام می‌شود.

۲-۲-۱-۱- منحنی‌های سونداژ الکتریکی در مهدیشهر

نگاه کلی به روند اصلی تمامی منحنی‌های سونداژ (تفسیر مجموعه‌ای)، تصمیم‌گیری بر روی مکانیسم تغییرات زمین‌شناسی و همچنین تهیه مقطع مناسب زمین‌شناسی را از روی داده‌های ژئوالکتریک آسانتر می‌سازد. منحنی سونداژهای واقع در حاشیه شهر در شاخه انتهایی از نوع بالارونده شده و بیانگر وجود سنگ کف با اندیس مقاومت الکتریکی بالا است. با این حال، اغلب نقاط در مرکز شهر در انتها پائین رونده بوده و به مقاومت‌های بسیار کم ختم می‌شوند. در سطوح نه چندان عمیق بازه تغییرات مقاومت الکتریکی وسیع‌تر است که به دلیل تنوع نهشته‌های آواری سطحی و گوناگونی تناوب لایه‌های سنگی دارای رخنمون است. در اعماق متوسط نیز گاهی بالاروندگی منحنی‌ها مبین وجود مناطق با مقاومت بالا به صورت لنزی در منطقه است. بر اساس بررسی‌های به عمل آمده، در قسمت‌های حاشیه شهر و نزدیک ارتفاعات به‌طور تقریبی اغلب منحنی‌ها بالارونده بوده و در قسمت‌های مرکزی و جنوبی دشت، اغلب پائین رونده هستند. این امر مبین وجود مارن قرمز دارای رخنمون در زیر آهک‌های حاشیه شهر و در

کاتالوگ زمین‌لرزه‌ها و برداشت‌های ژئودیتیک انجام می‌شود. بر این اساس در ساختگاه مورد مطالعه ابتدا اقدام به تهیه کاتالوگ قابل اعتماد از زمین‌لرزه‌ها در گستره مورد مطالعه گردید و سپس، گسله‌های اصلی لرزه‌زای منطقه مورد بررسی قرار گرفت. بررسی‌های زمین‌شناسی و لرزه‌شناسی انجام شده در ساختگاه مورد مطالعه، بیانگر جوان و جنبه بودن اغلب این گسله‌ها است. مطالعات نشان می‌دهد مهمترین گسله‌های موجود در شعاع ۳۰ کیلومتری نزدیک به شهر، گسله شمال سمنان، گسله عطاری در خاور و مجموعه گسله‌های سرخه، کلوت و گرمسار در باختر هستند.

۲-۱-۱- مجموعه گسله‌های پیرامون مهدیشهر

در بخش شمالی گسله شمال سمنان تا نزدیکی گسله آستانه، مجموعه‌ای از گسله‌ها شناسایی شده‌اند که اغلب درازایی کمتر از ۲۰ کیلومتر داشته و با فاصله اندک از یکدیگر قرار گرفته‌اند. اگرچه سن‌یابی مشخصی از این گسله‌ها در دست نیست، اما به نظر می‌رسد نقش جابه‌جایی از سامانه گسلی شمال سمنان به سامانه راستا لغز آستانه در بخش مرکزی البرز را داشته باشند. مهمترین گسله‌های پیرامون ساختگاه، گسله‌های نوکه، دیکتاش، گاوک، سفیداب، ریگاب و ازناپ هستند. با بررسی‌های صحرایی در راستای یکی از این گسله‌ها که از دره مهدیشهر عبور می‌نماید، به نظر می‌رسد ادامه جنوبی گسله ازناپ بوده و حرکت راستا لغز در آن به خوبی دیده می‌شود.

۲-۱-۲- برآورد نهایی تحلیل خطر زمین‌لرزه

محاسبات خطر زمین‌لرزه در شهر مهدیشهر بر پایه مطالعات و داده‌های زمین‌شناسی موجود از گسله‌های منطقه انجام شد. در این روش، نرخ جنبش گسله‌ها و یا مناطق لرزه‌زا، به وسیله ترکیبی از نتایج مطالعات پارینه‌لرزه‌شناسی، داده‌های ژئودیتیک، مطالعات زمین‌شناسی و سن‌سنجی مطلق برآورد شده و سپس، این نرخ جنبش به نرخ گشتاور لرزه‌ای و سرانجام به ضرایب گوتنبرگ و ریشتر تبدیل می‌شود. این ضرایب در برآورد خطر زمین‌لرزه در ساختگاه مورد مطالعه، به روش احتمالاتی مورد استفاده قرار گرفتند. در این روش، اثر تمام زمین‌لرزه‌های با اندازه‌های متفاوت که در مکان‌های متنوع از چشمه‌های متفاوت با احتمال رویدادهای متغیر رخ می‌دهند، به نحوی جمع زده می‌شود که احتمال فزونی سطوح مختلف جنبش زمین (بیشینه شتاب) در یک ساختگاه را در طول دوره زمانی مشخصی نشان دهد. در این پژوهش از میان روابط میرایی موجود، به ترتیب سه رابطه آمبراسیز و داگلاس، کمپبل و بزرگ‌نیا و آبراهامسون و سیلوا [۹، ۱۰، ۱۱] مورد استفاده قرار گرفتند.

با توجه به قرارگیری ساختگاه مورد نظر بر روی سرچشمه لرزه‌زا که گسله‌های شمالی و چندین گسله کوچک‌تر را در بر می‌گیرد، گستره شهر شتاب و طیف پاسخ تقریباً یکنواختی دارد (برای ۴۲ نقطه محاسبه شده). بر اساس مطالعات صورت گرفته، بیشینه شتاب روی سنگ بستر (PGA) و طیف پاسخ حرکت افقی زمین در نقاط مختلف گستره مهدیشهر بر روی سنگ کف با میانگین سرعت موج ۸۳۰ متر بر ثانیه در دوره‌های ۰.۷۵، ۰.۴۷۵، ۰.۹۷۵ و ۲۴۷۵ سال به ترتیب در حدود 0.02 g ، 0.029 g ، 0.033 g و 0.037 g به‌دست آمد و بیشینه شتاب طیفی در پریود ۰/۱۵ دیده می‌شود. به عنوان نمونه، در شکل ۱ طیف پاسخ شتاب افقی حداکثر برای دوره بازگشت ۴۷۵ ساله در سنگ بستر، ارائه شده است. بر اساس نتایج به دست آمده، بیشینه شتاب طیفی دارای مقدار 0.029 g و 0.072 g به ترتیب در پریود ۰ و ۰/۱۵ ثانیه است.

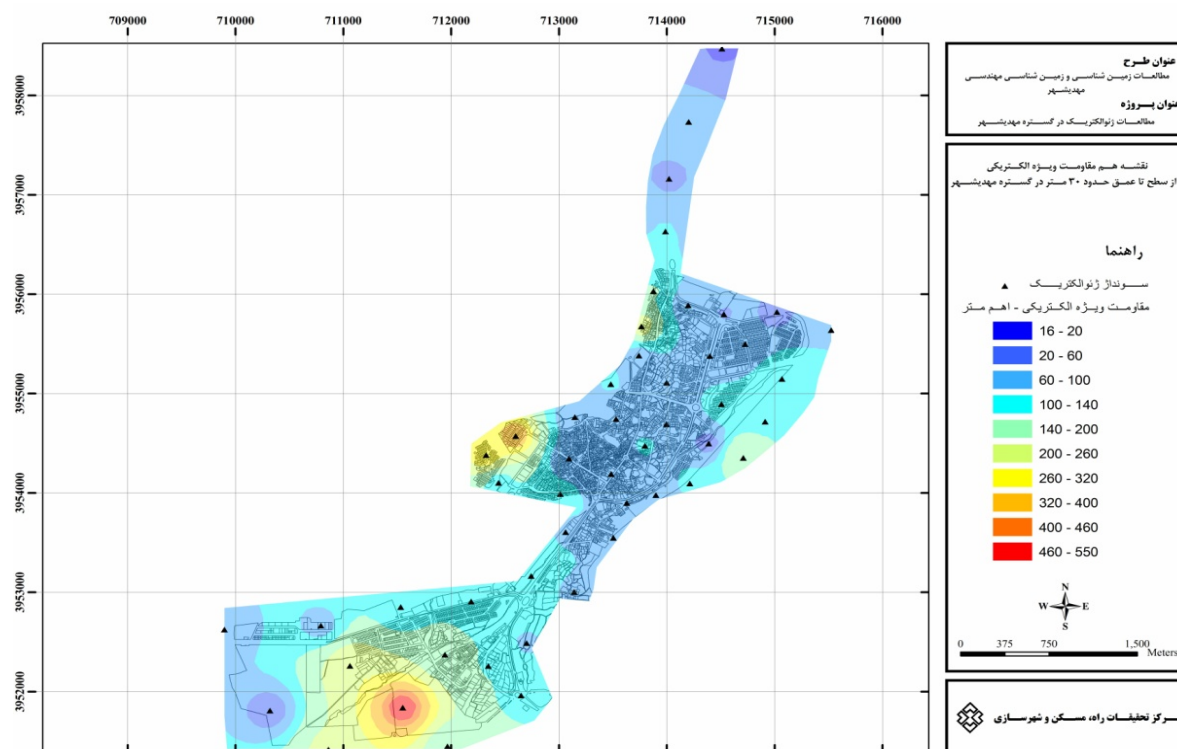
که گسلش باعث افزایش شدید ضخامت مارن در مرکز دره شده باشد. تلفیق کلیه اطلاعات و داده‌های زمین‌شناسی سطحی و ژئوالکتریکی به دست آمده، وجود دو سنگ کف با مقاومت‌های الکتریکی متفاوت در زیر سطح شهر، یکی از نوع آهک دارای مقاومت الکتریکی بالا در حواشی غرب و شرق شهر و دیگری مارن ضخیم با میان لایه‌های ماسه سنگی یا آهکی با ضخامت کم در بخش مرکزی شهر را می‌توان متصور شد. بر اساس نتایج به دست آمده، وجود گسل در منطقه مرکزی شهر از عمقی حدود ۳۰ متر به پائین محتمل است. دامنه تغییر اعداد مقاومت الکتریکی به تدریج از سطح به عمق، روند کاهشی بیشتری داشته و از ۹۰۰ به ۲۵۰ اهم متر تغییر می‌کند. نقشه هم مقاومت میانگین نشان می‌دهد که از سطح زمین تا عمق ۳۰ متر در بخش شمالی و مرکزی بین ۶۰ تا ۱۰۰ اهم متر متغیر است. در بخش جنوبی بین ۱۰۰ تا ۳۰۰ اهم متر مقاومت افزایش می‌یابد. بنابراین، انتظار زون اشباع در این سطوح منتفی است.

۲-۲-۲- بررسی‌های ژئوسایسمیک در گستره مهدیشهر

این بررسی‌ها با دو روش لرزه شکست مرزی و درون چاهی به ترتیب قبل و بعد از مطالعات ژئوتکنیک انجام شد. نحوه توزیع پروفیل‌های لرزه شکست مرزی، بر اساس پوشش کامل و امکان تطابق فراگیر قابل اطمینان از دیدگاه مطالعات مهندسی انجام شد.

قسمت‌های عمیق است. در این مطالعات به دلیل آرایه مناسب نقاط برداشت، نقشه‌های هم مقاومت در عمق‌های ۲/۵، ۵، ۱۰، ۱۵، ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰، ۲۵۰ و نقشه توزیع مقاومت میانگین برای عمق ۰ تا ۳۰ متری تهیه شد. بررسی نقشه‌ها، گسترش رسوبات ریز و درشت دانه و همچنین، وجود لنز یا عدسی‌هایی از رسوبات مختلف و سنگ کف مرکز و حواشی دره را مشخص می‌نماید. اگرچه دامنه تغییر اعداد مقاومت در سطح زمین تا ۹۲۰ اهم متر هم می‌رسد (رسوبات درشت‌دانه و خشک)، با این حال در عمق حدود ۲۵۰ متری حداکثر مقاومت الکتریکی به ۲۳۰ اهم متر می‌رسد. این امر نشان از دانه‌بندی بسیار ریزتر و با رطوبت بیشتر و یا وجود سنگ کف مارنی و شیلی متراکم است. بر اساس نقشه هم مقاومت میانگین از سطح زمین تا عمق ۳۰ متر در گستره مهدیشهر، نشان از مجزا شدن بخش مرکزی دره از حواشی سنگی آن و وجود منطقه کم مقاومت در بخش خط القعر دره است (نقشه ۱). همچنین، سنگ آهک حاشیه و رسوبات درشت دانه مرتبط با آن دارای مقاومت بالا بوده و به سمت مرکز دره به رسوبات ریزدانه مرکزی تبدیل می‌شوند.

نکته مهم دیگر وجود احتمالی گسلی در راستای خط القعر دره است. دلیل این امر می‌تواند وجود مارن با ضخامت زیاد در دره و نبود آن در دره شمال غربی و نیز هوازدگی و دگرسانی بیشتر شیل‌ها و مارن‌ها همراه با خردشدگی‌های تکتونیکی شدیدتر در منطقه باشد. با توجه به نزدیکی ارتفاعات دو سمت دره و عمق قابل محاسبه سنگ کف دره به نظر می‌رسد



Map 1 Average iso resistance distribution map for depth of 0 to 30 m in Mahdishahr area

نقشه ۱ نقشه توزیع هم مقاومت میانگین برای عمق ۰ تا ۳۰ متر سطحی در مهدیشهر

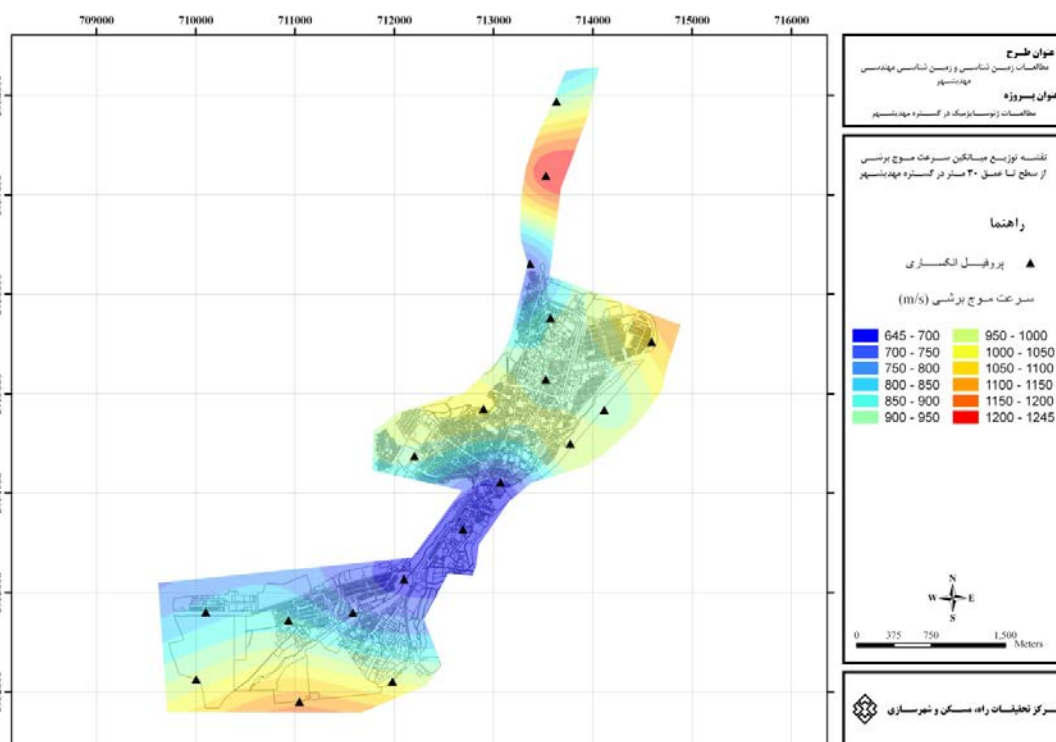
ایستایی، چینه‌شناسی، سنگ‌شناسی، ساختمان‌های زمین‌شناسی و مناطق شکستگی را بررسی نمود. در گستره مهدیشهر ۳۸ پروفیل لرزه شکست مرزی برداشت شد. از این تعداد، ۱۹ پروفیل مربوط به امواج طولی و ۱۹ پروفیل دیگر برای امواج برشی است. برای هر برداشت در مقاطع P به

۲-۲-۲-۱- عملیات لرزه شکست مرزی

این روش برای بررسی‌های کلی ساختمان و با هدف تعیین خواص دینامیکی و مهندسی زلزله مناسب است. با استفاده از روش لرزه شکست مرزی می‌توان شرایط زمین‌شناسی ساختمان اعم از عمق سنگ بستر، سطح

اندازه‌گیری امواج برشی در راستای ۱۹ پروفیل لرزه شکست مرزی در نقشه ۲ نشان داده شده است. در این نقشه توزیع سرعت از ۶۴۵ تا ۱۲۴۵ متر بر ثانیه متغیر است. در قسمت‌هایی از شمال و جنوب، سرعت به ترتیب تا ۱۲۴۵ و ۱۱۵۰ متر بر ثانیه افزایش می‌یابد. در قسمت نوار مرکزی و ابتدای نوار شمالی، سرعت تا ۶۴۵ متر بر ثانیه کاهش می‌یابد. به‌طور کلی میانگین سرعت موج برشی در نوار مرکزی و پیرامون آن از سایر مناطق کمتر است. توزیع مقادیر سرعت امواج برشی و امواج تراکمی سنگ بستر لرزه‌ای حاصل از اندازه‌گیری در راستای ۱۹ پروفیل لرزه شکست مرزی به ترتیب از ۷۵۵ تا ۸۹۰ و ۱۲۷۵ تا ۲۱۱۵ متر بر ثانیه متغیر است.

طورمعمول، پنج شوت صورت گرفته و در مقاطع S، شش شوت با چشمه موج برشی که دو به دو دارای پلاریته معکوس هستند انجام شد. برای به دست آوردن داده‌های تا عمق ۳۰ متر و با دقت بالاتر در تفکیک لایه‌بندی، فاصله گیرنده‌ها ۳/۷۵ متری و یکسان طراحی شد. در این روش با استفاده از نرم‌افزار Seisimager، ۱۷ لایه تشخیص داده می‌شود. ضخامت لایه‌ها به ترتیب یک لایه ۰/۶ متری، ۶ لایه ۱/۱ متری و ۱۰ لایه ۲/۳ متری است. جهت کسب داده‌های تا عمق ۳۰ متر و با دقت بالاتر در تفکیک لایه‌بندی، فاصله گیرنده‌ها به طور یکسان و به طول ۳/۷۵ متر طراحی گردید. توزیع میانگین سرعت موج برشی از سطح تا عمق ۳۰ متر حاصل از



Map 2 Average shear wave velocity distribution in Mahdishahr area based on refraction data

نقشه ۲ توزیع میانگین سرعت موج برشی در گستره مهدیشهر بر اساس مطالعات لرزه شکست مرزی

مقادیر سرعت موج برشی و عمق سنگ بستر لرزه‌ای، گستره مورد مطالعه در گروه I و II قرار می‌گیرد.

۲-۳-۳ مطالعات زمین‌شناسی مهندسی و ژئوتکنیک ساختگاه

به منظور شناخت هر چه بیشتر از نوع و رفتار خاک از سطح تا عمق سنگ بستر لرزه‌ای، انجام حفاری‌های دستی و ماشینی به صورت نمونه‌برداری پیوسته و آزمایش‌های برجا و آزمایشگاهی انجام شد. ابتدا نقاط حفاری به کمک نتایج حاصل از بررسی‌های لرزه شکست مرزی و بازدیدهای صحرایی جانمایی شدند. جانمایی نقاط به گونه‌ای انجام شد که تا حد امکان تمامی گستره شهر را تحت پوشش قرار دهد. بر این اساس، ۱۲ نقطه به عنوان نقاط حفاری ماشینی انتخاب گردید (نقشه ۳). به منظور ارزیابی پارامترهای ژئوتکنیکی مصالح ساختگاه، آزمایش صحرایی مقاومت نفوذ استاندارد (SPT)، به عنوان مناسب‌ترین آزمایش در نظر گرفته شد. با توجه به سیمان شدگی قوی لایه‌های خاک و نوع دانه‌بندی انجام این آزمایش میسر نبود. شایان ذکر است تمامی گمانه‌ها به آب برخورد کرد. به منظور تعیین دقیق‌تر خصوصیات مهندسی مصالح ساختگاه، آزمایش‌های شاخص و

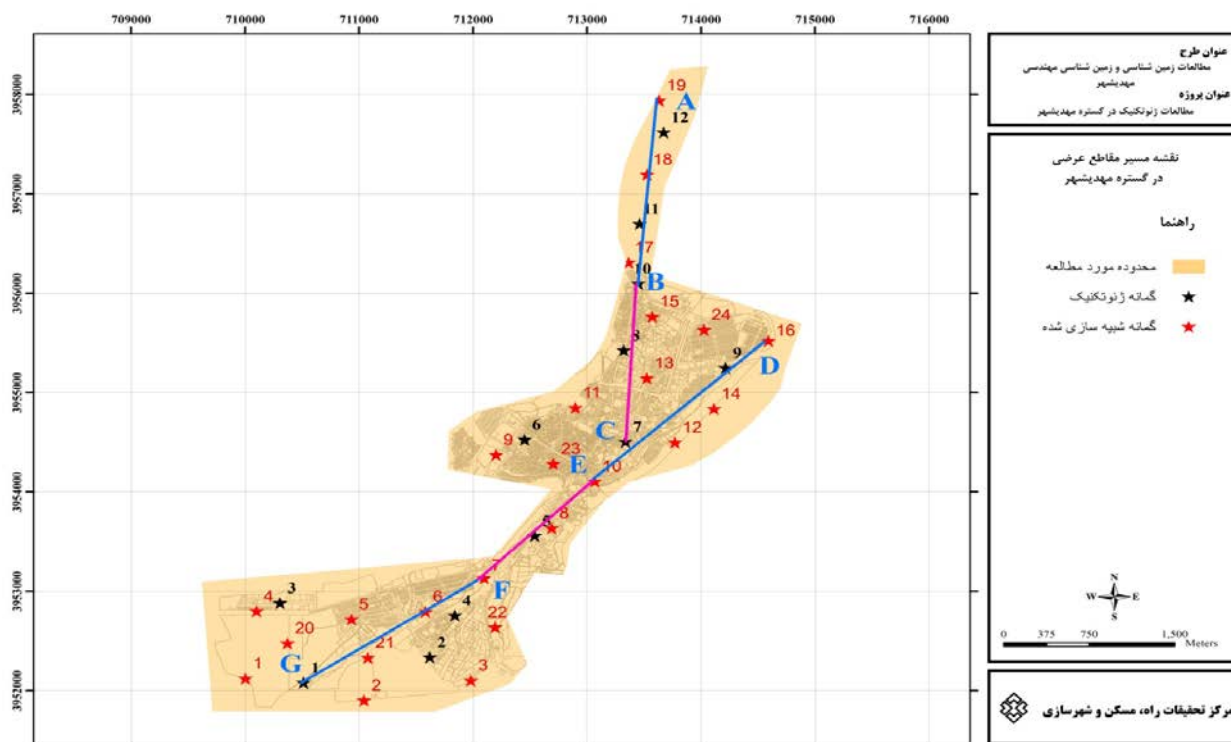
۲-۲-۲-۲ عملیات لرزه‌نگاری درون‌چاهی

در ادامه مطالعات، ۱۲ گمانه در ساختگاه مورد مطالعه حفر شد و در این گمانه‌ها علاوه بر مطالعات ژئوتکنیک، عملیات لرزه‌نگاری درون‌چاهی انجام شد (نقشه ۳). محل گمانه‌ها علاوه بر تبعیت از یک شبکه نسبتاً منظم و پوشش نسبی ساختگاه، در راستای تدقیق مطالعات انتخاب شد. نقشه توزیع مقادیر عمق سنگ بستر لرزه‌ای حاصل از اندازه‌گیری امواج برشی به روش لرزه‌نگاری درون‌چاهی در شهر مهدیشهر نشان می‌دهد که عمق سنگ بستر لرزه‌ای از ۵ تا ۱۸ متر متغیر است. عمق سنگ بستر لرزه‌ای در مناطق میانی متمایل به جنوب و نیز در محدوده‌ای از شمال‌شرقی شهر و در نقاطی که توزیع سرعت متوسط موج برشی در آنها کمتر از بقیه مناطق بوده، مشاهده می‌شود. توزیع میانگین سرعت موج برشی از سطح تا عمق ۳۰ متر حاصل از اندازه‌گیری امواج برشی به روش لرزه‌نگاری درون‌چاهی در مهدیشهر نشان می‌دهد که سرعت از ۶۴۰ تا ۸۰۰ متر بر ثانیه متغیر است. نتایج نشان می‌دهد سرعت موج برشی از نیمه مرکزی به سمت شمال و جنوب افزایش می‌یابد. بر اساس استاندارد ۲۸۰۰ ایران [۱۲] و با توجه به

سطح و عمق، مقاطع زمین‌شناسی مهندسی براساس جنس خاک ساختگاه تهیه و مورد بررسی قرار گرفتند. با توجه به گسترش طولی زیاد، تنوع لایه‌بندی و نوع ساختار زمین‌شناسی که همگی باعث کاهش دقت مطالعات می‌شوند، لذا هر مقطع به چندین زیر مقطع تقسیم گردید.

جهت پروفیل مقطع D-E-F-G از شمال شرق به جنوب غرب شرق و به طول تقریبی ۵۰۰۰ متر است (نقشه ۳). جنس خاک در این مقطع در مسیر D-E، از نوع SW و در مسیر E-F به ترتیب از نوع SW، CL و SM است. در ادامه و در مسیر F-G ابتدا به ترتیب از نوع CL و SM و سپس، در میانه مقطع SW و در نهایت به سمت جنوب شرق SM است.

مکانیکی، شامل دانه‌بندی و هیدرومتری، حدود اتربرگ، دانسیته نسبی، وزن مخصوص ویژه دانه‌های خاک و تراکم مطابق استانداردهای موجود انجام شد. بر اساس نتایج آزمایش دانه‌بندی، خاک ساختگاه مورد مطالعه به‌طور عمده درشت‌دانه و از نوع SW، GC، CL و SM بوده و جنس غالب خاک، ماسه لای دار (SW) است. در شکل (۲) لوگ گمانه‌ها و مقادیر سرعت موج برشی حاصل از آزمایش لرزه‌نگاری درون چاهی در اعماق مختلف ارائه گردیده است. در ادامه، به کمک نرم‌افزارهای Rock work و Arc GIS و روش آماری فاصله معکوس وزنی (IDW) با استفاده از داده‌های مطالعات ژئوفیزیک و ژئوتکنیک، تعداد ۲۴ گمانه در گستره شهر شبیه‌سازی شد (نقشه ۳). به منظور تعیین روند گسترش طولی خاک در



Map 3 Geotechnical drilled boreholes and simulated and paths of geological profiles in Mahdishahr area

نقشه ۳ موقعیت گمانه‌های ژئوتکنیک و درون چاهی و شبیه‌سازی شده، مسیر پروفیل‌های زمین‌شناسی در گستره شهر مهدیشهر

۴-۲- مطالعات ژئوتکنیک لرزه‌ای

پارامترهای حرکت زمین از قبیل شتاب حداکثر، ضرایب تشدید، پریود طبیعی زمین و مقادیر مربوط به طیف پاسخ شتاب جهت محاسبه پارامترهای حرکت زمین در دوره‌های بازگشت ۷۵، ۴۷۵ و ۲۴۷۵ سال در گستره مهدیشهر محاسبه گردید. در نهایت، نقشه‌های توزیع شتاب، ضرایب تشدید، پریود طبیعی زمین و مقادیر طیف پاسخ شتاب تهیه شد.

مطالعات تحلیل پاسخ ساختگاه با استفاده از نتایج مراحل قبلی (شناسایی‌های ژئوفیزیکی، ژئوتکنیکی و تحلیل احتمالاتی خطر زلزله) با استفاده از نرم‌افزار EERA [۱۳] و تحلیل خطی معادل یک بعدی به صورت تک نقطه‌ای [۱۴]، در ۳۶ گمانه (۱۲ گمانه ژئوتکنیکی حفر شده و همچنین ۲۴ گمانه شبیه‌سازی شده)، انجام شده است. سپس، مقادیر

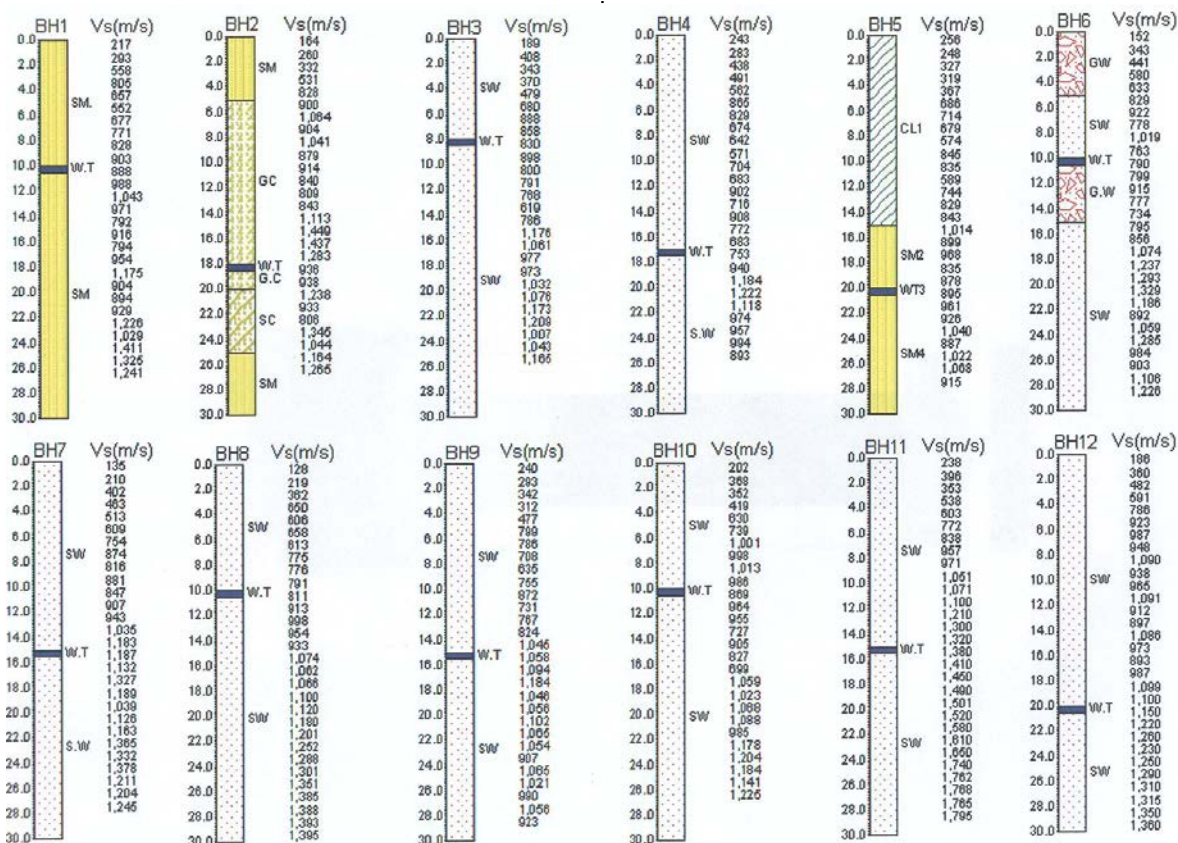


Fig. 2 Drilled borehole logs in studied area

شکل ۲ لوگ گمانه‌های حفاری شده در ساختمان مورد مطالعه

جدول ۱ مصالح به کار رفته در تحلیل‌ها برای گستره مهدیشهر

Table 1 Materials used for analysis in Mahdishahr area

شماره مصالح	عمق (متر)	جنس مصالح درشت‌دانه
۱	۶-۰	SW
۲	۶-۰	SM
	۱۵-۶	SW
	۶-۰	SC
۳	۱۵-۶	SM
	۳۷-۱۵	SW
	۱۵-۶	SC
۴	۳۷-۱۵	SM
۵	۳۷-۱۵	SC
۶	۱۵-۱۰	GW
۷	۱۵-۱۰	GC
	۲۰-۱۰	GW
۸	۲۰-۱۰	GC

۲-۴-۱- معرفی منحنی‌های رفتاری

به منظور تهیه پارامترهای ورودی تحلیل‌های دینامیکی، منحنی‌های مناسب برای لایه‌های مختلف خاک در منطقه انتخاب شدند. با توجه به حساسیت مدل‌های رفتاری خاک‌های دانه‌ای به عمق و خاک‌های چسبنده به اندیس خمیری خاک، منحنی‌های مورد استفاده به ترتیب با عمق و میزان شاخص خمیری اصلاح شدند. نوع خاک در گستره مهدیشهر شامل دو نوع شن GW و GC است. همچنین، سه نوع ماسه شامل ماسه خوب دانه‌بندی شده SW، ماسه سیلتی SM و ماسه رسی SC و یک نوع رس CL تقسیم‌بندی شده‌اند (جدول ۱). منحنی‌های رفتاری مصالح شامل شکل ۳ ارائه شده است [۱۵، ۱۶]. ساده‌سازی‌هایی هم در لایه‌بندی خاک‌های مختلف در گمانه‌های حفاری شده صورت گرفته است.

گذشته ایران و مابقی از زلزله‌های خارجی) متناسب با سه دوره بازگشت ۴۷۵، ۷۵ و ۲۴۷۵ سال به صورت مجزا جهت تحلیل انتخاب شد.

۲-۴-۲- انتخاب شتابنگاشت‌های مناسب جهت تحلیل پاسخ
به منظور انجام دادن محاسبات تحلیل پاسخ ساختگاه و محاسبه طیف پاسخ بر روی سطح زمین لازم است تا یک سری شتابنگاشت‌های مناسب در سنگ بستر لرزه‌ای انتخاب و به پروفیل‌های ژئوتکنیکی مدل‌سازی شده اعمال گردد [۱۷]. بدین منظور با رعایت معیارهای حاکم بر انتخاب تاریخچه زمانی شتاب، تعداد ۱۵۲ رکورد از ۷۶ زلزله رخ داده در ایران [۱۸] و سایر کشورها [۱۹] جمع آوری گردید. با توجه به معیارهای حاکم، تعداد ۱۴ نگاشت مختلف (به ترتیب تعداد ۷، ۶ و ۸ رکورد از زلزله‌های

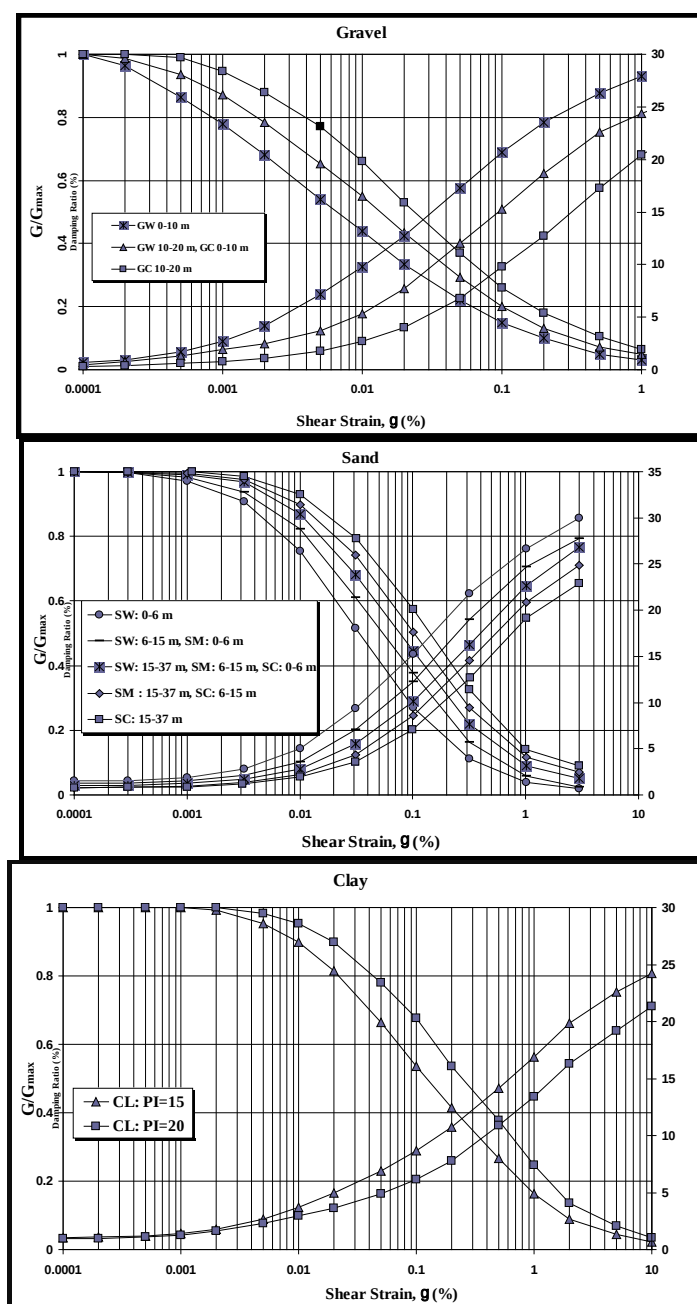


Fig. 3 Dynamic behavior for gravel, sand and clay materials for different depths of Mahdishahr city

شکل ۳ منحنی‌های رفتاری برای مصالح شنی، ماسه‌ای و رسی برای اعماق مختلف در گستره شهر مهدیشهر

۲-۴-۳- مقیاس کردن شتابنگاشت‌های انتخابی

رکوردهای انتخابی قبل از به‌کارگیری در تحلیل پاسخ زمین باید مقیاس شوند. در این مطالعات از دو روش مقیاس کردن ساده و سازگار با طیف هدف در حوزه زمان کردن با استفاده از نرم‌افزار EZ-FRISK [۲۰] بهره‌گرفته شده است. در نهایت، طیف‌های طراحی و سایر پارامترها براساس پوشش مناسب به دست آمده از دو روش انتخاب شده‌اند. طیف هدف برای دوره بازگشت‌های مختلف از پوش میانگین رکوردهای انتخاب شده و طیف خطر یکنواخت برای آن دوره بازگشت، حاصل گردید.

۲-۴-۴- نتایج تحلیل نقشه‌های پهنه‌بندی مهدیشهر برای پارامترهای

حرکت سطح زمین

شرایط محلی ساختگاه به دلیل تغییر در ضخامت و خواص لایه‌های خاک، عمق سنگ بستر و سطح ایستایی بسیار متفاوت است و اثرهای مهمی بر مشخصه‌های زمین‌لرزه در سطح زمین دارد. براساس تحلیل‌ها، حداکثر شتاب افقی وارده برای هر سه دوره بازگشت ۷۵، ۴۷۵ و ۲۴۷۵ سال در باریکه میانی شهر با تمایل به مناطق جنوب‌غربی و شمال‌شرقی (در محدوده میانی) بیشتر است. به عنوان مثال، نقشه ۴ توزیع بیشینه شتاب افقی برای دوره بازگشت ۴۷۵ سال در گستره مهدیشهر را نشان می‌دهد. در سایر نقاط شتاب بیشینه برای هر سه دوره بازگشت فوق‌الذکر، با شتاب کمتری مشاهده می‌شود. با این حال، در تمام نقاط شهر شتاب بیشینه روی خاک از شتاب سنگ بستر بالاتر بوده که نشان‌دهنده تشدید در تمام نقاط شهر است. بیشترین شتاب بیشینه برابر ۰/۳۲، ۰/۴۱ و ۰/۵۱ برابر شتاب ثقل زمین به ترتیب برای دوره‌های بازگشت ۷۵، ۴۷۵ و ۲۴۷۵ سال برآورد شده است. مقدار شتاب بیشینه دوره بازگشت ۴۷۵ سال از مقدار پیشنهادی استاندارد ۲۸۰۰ بالاتر است. توزیع شتاب بیشینه با سختی برشی لایه‌ها که از مطالعات لرزه‌نگاری سطحی و درون گمانه‌ای و نیز اطلاعات گمانه‌ای به‌دست آمده‌اند، تطابق خیلی خوبی دارد.

به دلیل سختی نسبی لایه‌های سطحی، پیوندهای طبیعی مقادیر کمتری دارند. حداکثر پیوند طبیعی در اکثر قسمت‌های شهر در حدود ۰/۱ ثانیه محاسبه شده است. به دلیل ایجاد تغییرشکل‌های (کرنش‌های) کمتر در زلزله‌های با دوره بازگشت ۷۵ سال و برعکس، تغییرشکل‌های بزرگتر در زلزله‌های با دوره بازگشت ۲۴۷۵ سال سختی زمین به ترتیب کمتر و بیشتر از تغییرشکل‌های مربوط به زلزله‌های با دوره بازگشت ۴۷۵ سال بوده و لذا به دلیل کاهش سختی زمین در زلزله‌های بزرگتر، پیوند طبیعی زمین نیز با بزرگتر شدن زلزله‌ها کاهش یافته است. اغلب بالا بودن پیوند طبیعی زمین نشان‌دهنده ضخامت بالای رسوبات و یا نرمی نسبی آنهاست و برعکس، سخت بودن و ضخامت کمتر باعث پایین بودن پیوند طبیعی زمین می‌شود. با این حال، این تغییرات در خصوص مهدیشهر بسیار کم بوده و همان‌گونه که ذکر شد، در تمام دوره بازگشت‌ها در حدود ۰/۱ ثانیه است. می‌توان پیش‌بینی کرد که زلزله‌های با پیوند غالب در محدوده ۰/۱ ثانیه بیشترین تشدید را تجربه خواهند کرد. تغییرات مقادیر پیوندها با میزان شتاب‌های حداکثر در تناسب نسبی قرار دارد. البته نقاطی که حداکثر پیوند طبیعی را داشته‌اند، الزاماً دارای حداکثر تشدید نبوده‌اند. برای توجیه این مطلب باید به عوامل مؤثر دیگر در تشدید توجه گردد. نگاه به پروفیل خاک در برخی مناطق شهر نشان‌دهنده افزایش ناگهانی سختی برشی خاک از عمق‌های بالاتر از ۵-۶ متر است. لذا علاوه بر تطابق پیوند غالب زلزله‌ها با پیوند طبیعی زمین، تضاد سرعت موج برشی و کم بودن آن در لایه فوقانی (بعضاً

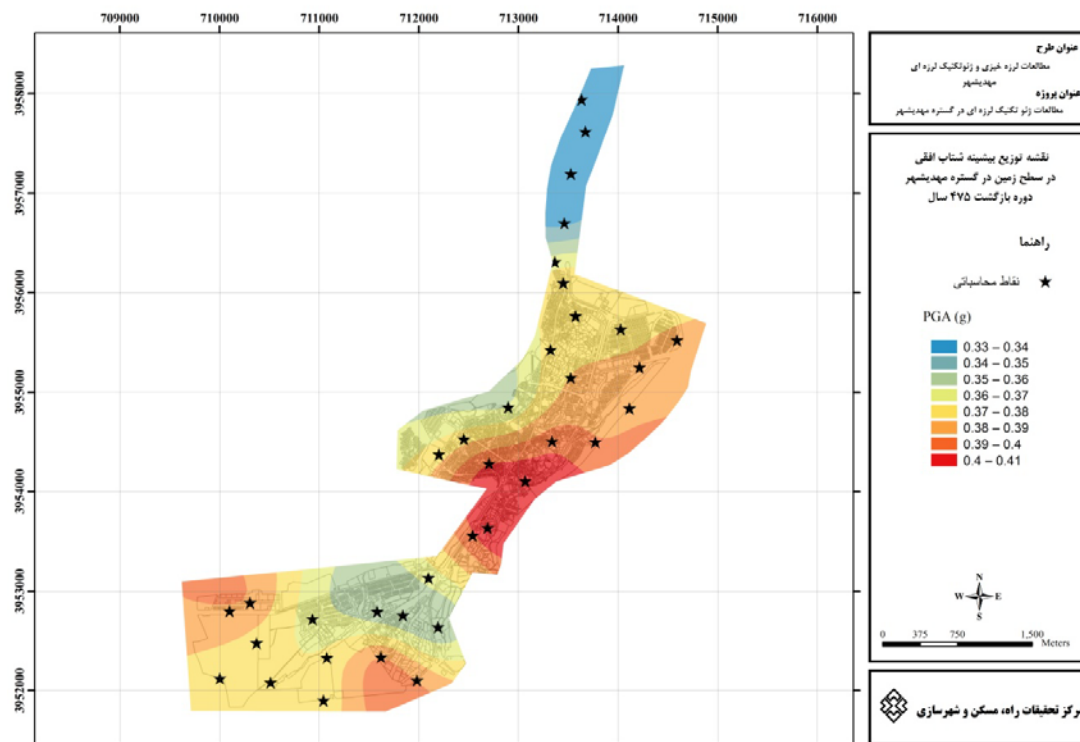
در حدود ۲۵۰ m/sec) نسبت به سرعت بالای ۷۵۰ m/sec در اعماق ۱۰ متر به پایین باعث تفاوت شدید در امپدانس‌های ویژه این لایه‌ها و در نتیجه باعث تشدید شده است. هم طیف‌های شتاب و هم طیف‌های سرعت در پیوندهای ۰/۱ ثانیه که به پیوند طبیعی زمین نزدیک است، تحت تأثیر لایه‌های سطحی قرار گرفته‌اند و در مناطقی تشدید شتاب و سرعت طیفی را می‌توان به وضوح مشاهده کرد. شتاب‌های طیفی در محدوده ۰/۱ ثانیه بیشترین مقدار را در مناطقی دارد که در آنها پیوند طبیعی زمین در همین حدود بوده است. بیشترین مقدار شتاب طیفی ۰/۱ ثانیه در حدود ۱/۱ g برای دوره بازگشت ۴۷۵ سال برآورد شده است. شتاب طیفی پیوندهای بالاتر با کاهش قابل‌توجهی روبرو است. شتاب طیفی ۰/۵ و ۱ ثانیه به ترتیب به مقادیر ۰/۴۴ و ۰/۲۱ شتاب ثقل زمین، کاهش پیدا کرده است که نشان‌دهنده شتاب کم احتمالی بر ساختمان‌های با پیوند طبیعی ۰/۵ تا ۱ ثانیه در تمام نقاط مهدیشهر است. این کاهش چشمگیر در خصوص سرعت طیفی در پیوندهای بالاتر اتفاق نمی‌افتد و این موضوع بر این ناحیه پیرویی از طیف‌های طراحی اثرگذار خواهد بود و این موضوع در طراحی سازه‌های مختلف بایستی منظور گردد. نقشه توزیع سرعت طیفی در پیوند ۰/۵ و ۱ ثانیه برای دوره بازگشت ۴۷۵ سال در گستره مهدیشهر حاکی از یکسان بودن حرکت سرعت طیفی در کلیه نقاط شهر است و به ترتیب با متوسطی در حدود ۳۳ و ۳۰ m/s است. نقشه‌های ارایه‌شده نشان‌دهنده غلبه تأثیر لایه‌های سطحی در پیوندهای حدود ۰/۱ ثانیه در اغلب نقاط منطقه مورد مطالعه است. به دلیل اینکه پیوندهای مذکور با پیوند طبیعی ساختمان‌های کوتاه یک طبقه سازگار است، بیشترین شتاب ناشی از زلزله‌های منطقه به این نوع سازه‌ها وارد خواهد شد. این در حالی است که ساختمان‌های بالاتر از پنج طبقه شتاب کمتری را به دلیل پاسخ فرکانسی خود از زلزله‌های این نواحی دریافت خواهند کرد. لذا در تمامی نقاط شهر، ساختمان‌های بلند احتمالاً عملکرد بهتری نسبت به ساختمان‌های ۱-۲ طبقه خواهند داشت. با توجه به رایج بودن ساختمان‌های کوتاه ۱-۲ طبقه در مهدیشهر باید به آسیب‌پذیری ساختمان‌های موجود و نیز کیفیت ساخت‌وسازهای جدید از نظر زلزله توجه بیشتری معطوف گردد.

۲-۵- نحوه انتخاب طیف طرح استاندارد

مهمترین بخش نقشه‌ها مربوط به طیف‌های طراحی استاندارد (به عنوان مثال طیف طرح شتاب) هستند که براساس ضوابط آیین‌نامه اروپا و آیین‌نامه IBC [۲۱] استفاده شده است. جهت ساختن طیف استاندارد تعیین پارامترهای S_s ، S_1 ، T_0 و T_s ضروری هستند. براساس دستورالعمل ATC-03-6 پارامتر S_s (یا همان پارامتر C_a) به صورت میانگین مقادیر شتاب طیفی در محدوده پیرویی ۰/۱ تا ۰/۵ ثانیه یا شتاب طیفی در پیوند ۰/۲ ثانیه تعریف می‌شود. پارامتر S_1 نیز به صورت مقدار متوسط شتاب طیفی در پیوند ۱ ثانیه تعریف می‌گردد. البته پارامتر C_a (متناظر با پارامتر S_1) به‌صورت مقدار متوسط سرعت طیفی در پیوند ۱ ثانیه تعریف می‌گردد. با توجه به زلزله‌های رخ داده در کشور ایران و اثرهای ساختگاهی در طیف‌های پاسخ این پروژه، با عنایت به فلسفه استخراج دو پارامتر S_s و S_1 ، تغییراتی در پیوند قرائت شتاب طیفی داده شده است. با توجه به منحنی‌های میانگین سرعت طیفی به دست آمده در مطالعات، پارامتر S_s از میانگین شتاب طیفی به روش مقیاس سازگار با طیف در محدوده پیرویی ۰/۰۸ تا ۰/۲ ثانیه (محدوده شتاب ثابت) قابل تخمین است. پارامتر S_1 نیز

گردیده است. پارامترهای T_s ، T_0 محل شکست طیف طرح در ناحیه شتاب ثابت است. این پارامترها نیز در نهایت به منظور تولید طیف طراحی نهایی استفاده شد (جدول ۲).

از بیشینه دو مقدار میانگین شتاب طیفی حداکثر به روش مقیاس سازگار با طیف و شتاب طیفی میانگین به روش مقیاس ساده در پریود 0.7 ثانیه (محدوده سرعت ثابت) قابل استنتاج است. مقدار پارامتر k نیز ۱ انتخاب



Map 4 Maximum horizontal acceleration for return period of 475 years in Mahdishahr area

نقشه ۴ توزیع بیشینه شتاب افقی برای دوره بازگشت ۴۷۵ سال در گستره مهدیشهر

جدول ۲ پارامترهای نهایی طیف طراحی برای گستره مهدیشهر

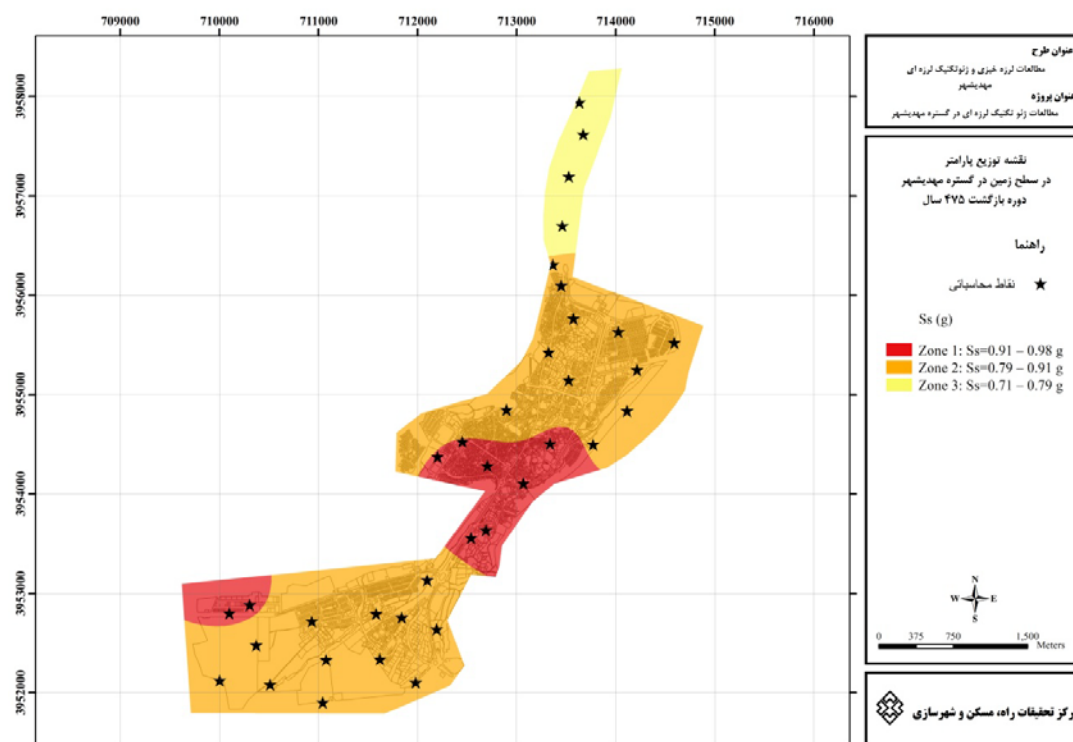
Table 2 Final parameters of design spectra for Mahdishahr area

مناطق	S_s	S_1	T_0	T_s
منطقه ۱	۰/۹۸	۰/۳۴	۰/۰۷	۰/۳۵
منطقه ۲	۰/۹۰	۰/۳۴	۰/۰۸	۰/۳۸
منطقه ۳	۰/۷۳	۰/۳۳	۰/۰۹	۰/۴۶

همان گونه که ملاحظه می شود طیف های طراحی ارایه شده برای نواحی ۱ و ۲ در محدوده پریوده های کم (کمتر از حدود 0.2 ثانیه) از طیف استاندارد ۲۸۰۰ بالاتر بوده و در محدوده پریوده های 0.2 تا حدود ۲ ثانیه در حدود طیف ۲۸۰۰ و در پریوده های بالاتر از ۲ ثانیه پایین تر از طیف ۲۸۰۰ قرار گرفته اند. طیف ناحیه ۳ به طور تقریبی با اندک تفاوتی در حدود طیف استاندارد ۲۸۰۰ است.

۲-۶- ارایه نواحی مختلف از نظر طیف طراحی استاندارد

به منظور تسهیل در امر طراحی سازه های مختلف در گستره مهدیشهر، با توجه به خصوصیات طیف های طراحی محاسبه شده برای دوره بازگشت ۴۷۵ سال، محدوده مورد مطالعه به سه ناحیه تقسیم و برای هر کدام از آنها به صورت جداگانه طیف های طراحی پیشنهاد شده است. محدوده هر کدام از این نواحی در نقشه ۵ ارایه شده است. طیف های طراحی مذکور با استفاده از پارامترهای ارایه شده در جدول ۲ قابل محاسبه هستند. همچنین، در شکل ۴ این طیف ها به طور مقایسه ای نشان داده شده اند.



Map 5 Three zone of Mahdishahr area for calculated design spectra

نقشه ۵ مناطق سه گانه گستره مهدیشهر برای معرفی طیف طراحی یکسان

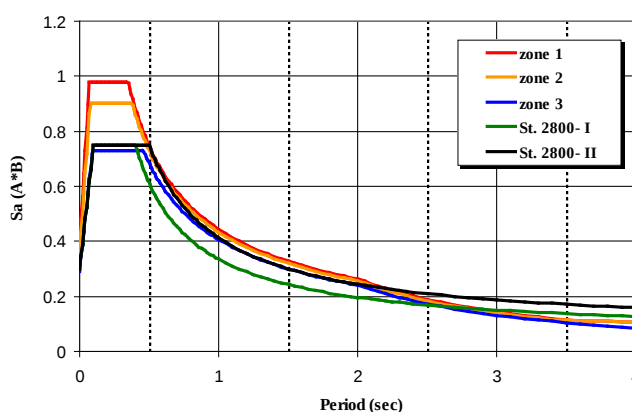


Fig. 4 Design spectra for three different areas in Mahdishahr area

شکل ۴ طیف های طراحی برای نواحی سه گانه گستره مهدیشهر

۳- نتیجه گیری

برای ساختگاه شهر مهدیشهر بر اساس بررسی های لرزه زمین ساخت، ژئوالکترونیک، ژئوسایزیک، زمین شناسی مهندسی و ژئوتکنیک لرزه ای نتایج ذیل حاصل شد:

۱. در گستره مهدیشهر دارای شتاب و طیف پاسخ یکنواختی است و بیشینه شتاب افقی زمین برای دوره بازگشت ۰.۷۵، ۰.۴۷۵، ۰.۹۷۵ و ۲.۴۷۵ به ترتیب در حدود ۰.۲۰g، ۰.۲۹g، ۰.۳۳g و ۰.۳۷g است.

۲. براساس داده های ژئوالکترونیک پردازش شده، تقریباً در بسیاری از نقاط برداشتی قسمت های سطحی زمین تا عمق کم پوشیده از رسوبات درشت دانه بوده و به تدریج با افزایش عمق، ریزدانه تر شده و این رسوبات ریزدانه ضخامت قابل توجهی دارند.

۳. بررسی داده های ژئوالکترونیک حاکی از وجود احتمالی گسلی در راستای خط القعر دره است.

- [4] TC4-ISSMGE, *Manual for Zonation on Seismic Geotechnical Hazard*, Revised edition, Technical Committee for Earthquake Geotechnical Engineering (TC4) of the International Society of Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE), p. 209, 1999.
- [5] A. Aghaei Araei, H. R. Razeghi, S. H. Tabatabaei, A. Ghalandarzadeh, *Dynamic properties of gravelly materials*, *Scientia Iranica*, Trans. A, Civil Eng. 2010, 17(4), pp. 245-261, 2010.
- [6] A. (Ed) Ansal, *Recent Advances in Earthquake Geotechnical Engineering and Microzonation*, Kluwer Academic Publishers, Printed in the Netherlands, 2004.
- [7] DRM, *Seismic microzonation for municipality's manual*, World institute for disaster risk management, 2004.
- [8] S. Hashemi Tabatabaei, M. Fatemi Aghda, A. Beitollahi, N. Saeid, A. Mohammadi, A. S. Salamat, *Guideline for preparation of geological engineering maps urban seismic microzonation*, 2010.
- [9] N. N. Ambraseys, J. Douglas, *Near-field horizontal and vertical earthquake ground motion*, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 23, pp. 1-18, 2003.
- [10] K. W. Campbell, Y. Bozorgnia, *Updated near-source ground motion (attenuation) relations for the horizontal and vertical components of peak ground acceleration and acceleration response spectra*, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 93, pp. 314-331, 2003.
- [11] N. A. W. J. Silva Abrahamson, W. J. Silva, *Comparisons of the NGA ground motion relations*, *Earthquake Spectra*, *Earthquake Engineering Research Institute*, 24(1), pp. 45-66, 2008.
- [12] Iranian Code of Practice For Seismic Resistant Design of Buildings, Standard No. 2800, 2nd revised edition.
- [13] J. P. Bardet, K. Ichii, C. H. Lin, *EERA: A Computer Program for Equivalent-linear Earthquake site Response Analyses of Layered Soil Deposits*, University of Southern California, 2000.
- [14] M. B. Baturay, J. P. Stewart, *Uncertainty and bias in ground-motion estimates from ground response analyses*, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 93(5), pp. 2025-2042, 2003.
- [15] A. Aghaei Araei, S. Hashemi Tabatabaei, A. R. Ghodrati Ghazaani, A. Ghalandarzadeh, *Assessments dynamic behavior of soil material using large scale triaxial equipment*, 2015.
- [16] A. Aghaei Araei, H. R. Razeghi, S. H. Tabatabaei, A. Ghalandarzadeh, *Loading frequency effect on stiffness, damping and cyclic strength of modeled rockfill materials*, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Elsevier; 33(1), pp. 1-18, 2012b.
- [17] Headquarters, U. S. Army Corps of Engineers, *Response Spectra and Seismic Analysis for Concrete Hydraulic Structures*, *Engineer Manual* 1110-2-6050, Washington, DC, 1999.
- [18] <http://www.bhrc.ac.ir/portal>, 2011.
- [19] Risk Engineering, *EZ-FRISK (Software for in-depth Seismic Hazard Analysis) User's Manual*, Risk Engineering Inc., Golden, Colorado, USA, 2011.
- [20] IBC (International Building Code), International Code Council, ICC, Falls Church, 2006.
- [21] ATC, *Tentative Provisions for the Development of Seismic Regulations for Buildings*, ATC Publication ATC 3-06, Applied Technology Council, NBS Special Publication 510, NSF Publication 78-8, U. S. Government Printing Office, Washington, DC, 1978.

۴. بررسی نقشه هم مقاومت میانگین از سطح زمین تا عمق ۳۰ متر در گستره مهدیشهر حاکی از تغییر ۶۰ تا ۱۰۰ اهم متر در بخش‌های شمالی و مرکزی ساختمان است. در بخش جنوبی مقاومت الکتریکی بین ۱۰۰ تا ۳۰۰ اهم متر افزایش می‌یابد. لذا وجود زون اشباع در این سطوح منتفی است.

۵. دامنه تغییر اعداد مقاومت الکتریکی به تدریج از سطح به اعماق زیادتر کاهش می‌یابد و از ۹۰۰ به ۲۵۰ اهم متر تغییر می‌کند.

میانگین سرعت موج برشی و موج تراکمی از سطح تا عمق ۳۰ متر حاصل از اندازه‌گیری امواج برشی در راستای ۱۹ پروفیل لرزه شکست مرزی به ترتیب از ۶۴۵ تا ۱۲۴۵ و ۱۴۷۰ تا ۲۸۰۰ متر بر ثانیه متغیر است.

۶. توزیع میانگین سرعت موج برشی براساس نتایج حاصل از روش درون چاهی در گستره مهدیشهر از سطح تا عمق ۳۰ متری، از ۶۴۰-۸۰۰ متر بر ثانیه و عمق سنگ بستر لرزه‌ای از ۵ تا ۱۸ متر متغیر است.

۷. گستره مورد مطالعه براساس استاندارد ۲۸۰۰ ایران در گروه I و II قابل طبقه‌بندی است.

۸. برای مناطقی در شهر مهدیشهر که شیب زمین بیش از ۳۰ درجه، ارتفاع شیب بیش از ۳۰ متر و سازه در یک سوم بالایی شیب قرار دارد، باید با استفاده از ضرایب اصلاحی بر طیف یک بعدی استفاده شود.

۹. بررسی نتایج نشان می‌دهد خاک‌های منطقه شامل SW, GW, CL, SM, GC است. نمونه‌های اخذ شده از گمانه‌های اکتشافی عمدتاً خاک درشت‌دانه است. خاک SW عمده خاک منطقه را تشکیل می‌دهد.

۱۰. حداکثر شتاب افقی وارده برای هر سه دوره بازگشت ۰.۷۵، ۰.۴۷۵ و ۰.۳۲ سال در باریکه میانی شهر با تمایل به مناطق جنوب‌غربی و شمال‌شرقی (در محدوده میانی) بیشتر است. بیشترین شتاب بیشینه برابر ۰.۳۲، ۰.۴۱ و ۰.۵۱ برابر شتاب ثقل زمین به ترتیب برای دوره‌های بازگشت ۰.۷۵، ۰.۴۷۵ و ۰.۳۲ سال برآورد شده است. مقدار شتاب بیشینه دوره بازگشت ۰.۷۵ سال از مقدار پیشنهادی استاندارد ۲۸۰۰ بالاتر است.

۱۱. شتاب‌های طیفی در محدوده ۰/۱ ثانیه بیشترین مقدار در حدود ۱/۱g برای دوره بازگشت ۰.۷۵ سال را در مناطقی دارد که در آنها پیوند طبیعی زمین در همین حدود بوده است و این نقاط احتمالاً تشدید را تجربه خواهند کرد.

۱۲. با توجه به غلبه تأثیر لایه‌های سطحی در پیوندهای حدود ۰/۱ ثانیه در اغلب نقاط منطقه مورد مطالعه و همچنین سازگاری پیوندهای مذکور با پیوند طبیعی ساختمان‌های کوتاه یک طبقه، بیشترین شتاب ناشی از زلزله‌های منطقه به این نوع سازه‌ها وارد خواهد شد. با توجه به رایج بودن ساختمان‌های کوتاه ۱ تا ۲ طبقه در مهدیشهر باید به آسیب‌پذیری ساختمان‌های موجود و نیز کیفیت ساخت‌وسازهای جدید از منظر زلزله توجه بیشتری معطوف گردد.

۴- مراجع

- [1] M. Haeri, B. Gatmiri, *Seismic microzonation of urban city*, Natural disaster management center of Iran.
- [2] T. G. Sitharam, P. Anbazhagan, J. N. Naredra Kumd, *Geographic information system, a case study of Bangalore city*, Department of civil engineering, institute of science, Bangalore, India, 2007.
- [3] S. A. Naeini, A. Zarincheh, *Site Effect Microzonation and Seismic Hazard Analysis of Kermanshah Region in Iran*, *Journal of Applied Sciences*, No. 10, pp. 2231-2240, 2010.



بررسی آجر نمای انعطاف پذیر

سهراب ویسه^{۱*}، علی اکبر یوسفی^۲، شروین احمدی^۳

۱. عضو هیأت علمی مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی

۲. عضو هیأت علمی پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران

۳. عضو هیأت علمی پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران

* تهران، بزرگراه شیخ فضل الله نوری، فاز ۲ شهرک فرهنگیان، خیابان نارگل، خیابان شهید علی مروی، خیابان حکمت، صندوق پستی: ۱۶۹۶-۱۳۱۴۵

E-mail: veiseh@bhrc.ac.ir

چکیده

ضرورت صرفه جویی در مصرف انرژی و سبک سازی ساختمان با استفاده از روش های تولید صنعتی سبب شده است که مصالح جدید نماسازی در دنیا متداول شود. برخی از این سامانه های نمای جدید علاوه بر نماسازی به منظور عایق کاری حرارتی سطوح بیرونی دیوارها نیز به کار برده می شوند. برای نماسازی و عایق کاری حرارتی همزمان ساختمان سامانه نمای عایق حرارتی بیرونی (ETICS) گزینه مناسبی است. این سامانه متشکل از یک لایه عایق حرارتی، یک لایه اندود زیرکار تقویت شده با مش الیاف شیشه و یک لایه اندود نمای نهایی است. در این پژوهش، جایگزینی اندود نهایی ETICS با آجر نمای انعطاف پذیر بررسی شد. نمونه های آجر یاد شده مشابه محصول تولید شده در جمهوری چک در مقیاس آزمایشگاهی طراحی و ساخته شدند. در تهیه نمونه ها، از ماسه سیلیسی و پلیمرهایی بر پایه آکرلیک استر همراه با مواد افزودنی لازم استفاده شد و با آن مخلوط گردید. آزمایش های مختلف استاندارد بر روی نمونه های ساخته شده انجام شد. نتایج آزمایش ها رضایت بخش بودند و خواص برخی از نمونه های آجر نمای انعطاف پذیر آزمایشگاهی حتی از خواص آجر تجاری بهتر بود. نتایج به دست آمده حاکی از خواص مناسب یکی از آمیزه هاست، با این تفاوت که در نمونه بومی از الیاف شیشه برای تقویت و افزایش خواص کششی استفاده شد که مقاومت کششی را تا دو برابر افزایش داد. جذب آب، مقاومت فرورفتگی و مقاومت در برابر ضربه نیز در حد قابل قبول و مشابه نمونه خارجی بود. بررسی ها نشان داد که تولید این آجرها در ایران امکان پذیر است.

کلید واژگان

آجر، انعطاف پذیر، نما، عایق حرارتی

An Investigation on Flexible Facing Bricks

Sohrab Veiseh^{1*}, Ali Akbar Yousefi², Shervin Ahmadi³

1. Road, Housing and Urban Development Research Center

2. Iran Polymer and Petrochemical Institute

3. Iran Polymer and Petrochemical Institute

* P.O. Box 13145-1696, Tehran, Iran, veiseh@bhrc.ac.ir

Abstract

The need to save energy and lighten the building using industrial production methods has led to the emergence of new cladding materials in the world. Some of these new materials, in addition to facing, are used for thermal insulation of the external walls. External Thermal Insulation Composite System (ETICS) is a suitable option for the cladding and at the same time thermal insulation of the buildings. It consists of thermal insulation, the base coat reinforced by glass fiber mesh and a layer of top coat. In this study, the replacement of ETICS final coat with the flexible bricks was investigated. Flexible brick specimens similar to those produced in the Czech Republic were designed and manufactured on a laboratory scale. In the preparation of samples, silica sand and polymers based on acrylic Ester with the necessary additives were used. The ingredients were mixed well and placed inside the molds. After drying, the samples were taken out of the molds. The standard tests were performed on the samples. The results of the experiments were promising, and the properties of some flexible laboratory brick samples were even better than those of commercial bricks. The obtained results indicate the suitable properties of one of the compounds, with the difference that in the native sample, glass fibers were used to strengthen and increase the tensile properties, which increased the tensile strength up to twice. Other characteristics of this mixture such as water absorption, density, resistance to penetration and impact resistance were acceptable and similar to the foreign samples. Studies have shown that the production of these bricks in Iran is possible.

Keywords

Brick, Flexible, Facing, Thermal Insulation

۱- مقدمه

آجر دارای ظاهر زیبای ویژه‌ای است. برای هزاران سال آجر برای تعیین سبک معماری مؤثر بوده است. در جهان امروز نیز از آجر در طراحی‌ها به عنوان مصالحی با مشخصات ظاهری عالی و کیفیت برتر استفاده می‌کنند. آجر هماهنگی کاملی با رنگ‌های طبیعی دارد و دارای شکل و بافت جذابی است. بنابراین، همیشه جای ثابتی را در بحث طراحی ساختمان‌ها دارد. این نه تنها به دلیل خصوصیات فنی آن، بلکه همچنین به عنوان عنصری زیبا در طراحی محیط است. در ساختمان‌سازی صنعتی و جدید با قاب‌های فولادی یا بتنی و دیوارهای جداکننده، نمای خارجی آجری که عنصری آشنا برای محیط ساخت‌وساز است به دو هدف کمک می‌کند:

- ۱- زیبایی: نمای آجری بسیار زیباست و به همین دلیل، تعداد ساختمان‌های با نمای آجری در جهان زیاد است.
- ۲- محافظت دیوار خارجی در برابر باران و نفوذ آب به داخل ساختمان: که با استفاده از خاصیت مویبندی اکثر آجرهای پلاک سنتی انجام می‌گیرد.
- ۳- دوام زیاد

در مقابل مشخصات فنی خوب، آجرهای سنتی معایب خود را نیز دارد. آنها سنگین‌اند و نصبشان به کارگران ماهر نیاز دارد. اجرای آنها وقت‌گیر است. جایگزینی برای نمای آجر رسی سنتی، سامانه نمای آجر انعطاف‌پذیر با عایق کاری حرارتی بیرونی است. این سامانه راه حل مبتکرانه و خلاقانه‌ای به منظور ساختمان‌سازی صنعتی برای ساختمان‌های جدید، بازسازی و پیش‌سازی است. نمای ساختمان در این روش، سریع نصب می‌شود و باعث صرفه‌جویی در نیروی کار و کارهای بنایی (در محل کارگاه ساختمانی) می‌شوند. آجرهای انعطاف‌پذیر (فلکسی) با ضخامت کم برای کاربردهای داخلی و خارجی طراحی می‌شوند. آجر انعطاف‌پذیر بیش از ۳۰ سال است که توسعه یافته و در اروپا در کاربردهای درونی و بیرونی ساختمان استفاده شده است. نمای عایق حرارتی بیرونی با آجر انعطاف‌پذیر منحصر به فرد است، دوام بالایی دارد و حداقل نگهداری را نسبت به نمای آجری سنتی ارائه می‌دهد. اما هیچ‌یک از معایب آن را ندارد. در این سامانه، از آجرهایی به ضخامت ۳ میلی‌متر به جای آجرهای پلاک سنتی به ضخامت ۲۰ میلی‌متر استفاده می‌شود [4-1].

سامانه نمای مرکب عایق حرارتی بیرونی (ETICS)^۱ برای سطوح دیوارهای خارجی و یا زیرطاق‌های موجود یا جدید به منظور بهبود عایق کاری حرارتی به کار برده می‌شود. نوع مبتکرانه‌ای از آن، سامانه نمای عایق حرارتی با آجر انعطاف‌پذیر است. این سامانه از قسمت‌های زیر تشکیل می‌شود: چسب، پنل عایق حرارتی (معمولاً تخته EPS)، زیرلایه شامل ملات خشک آماده مسلح شده با مش الیاف شیشه، بست‌های پنل، چسب و آجر نمای انعطاف‌پذیر. این آجرها به عنوان لایه نهایی ETICS به کار می‌رود. با استفاده از این سامانه نما شامل EPS، می‌توان تا بیش از ۵۰ درصد در مصرف انرژی صرفه‌جویی کرد [5-6].

این ناماسازی عایق حرارتی بیرونی منحصر به فرد، دوام بالایی دارد و حداقل نگهداری را نیاز دارد. اما هیچ‌یک از معایب آجرهای سنتی از جمله وزن زیاد را ندارد. آجر نمای انعطاف‌پذیر از پرکننده معدنی سیلیکاتی و چسباننده اکریلیکی ساخته می‌شود. این آجرها ناماسازی آجری رسی را شبیه‌سازی می‌کنند. در صورت استفاده از این نوع آجرها می‌توان عایق کاری حرارتی دیوار بیرونی را بر روی ساختمان‌های جدید یا موجود انجام داد. با

استفاده از این سامانه‌های نما، می‌توان تا بیش از ۵۰ درصد در مصرف انرژی صرفه‌جویی کرد. به دلیل محافظت از دیوارهای بیرونی ساختمان و جلوگیری از نفوذ نم، عمر مفید ساختمان‌ها نیز افزایش می‌یابد. این سامانه سبک است و وزن آن تنها حدود ۲۹ کیلوگرم بر مترمربع است. بنابراین، نیاز به زیرسازی اضافی و دستگاه‌های نصب سنگین را کاهش می‌دهد [7-9].

آجر انعطاف‌پذیر عملی‌ترین آجر نازک موجود در بازار کشورهای اروپایی است و برای مقاصد تزئینی، تغییر دکوراسیون بیرونی ساختمان و غیره به کار می‌رود. این آجرها معمولاً از درصد بالایی ماسه کوارتزی با دانه‌بندی خاص با یک چسب پلی‌اکریلیک تشکیل می‌شوند. این آجرها مانند اکثر آجرهای نازک، شکننده نیستند و آنها را می‌توان با دست خم کرد. این امر امکان استفاده از آنها را برای سطوح منحنی و ناهموار فراهم می‌کند [10].

آجرهای انعطاف‌پذیر شامل مواد زیر است: رزین مصنوعی پراکنده در آب، ماسه کوارتزی، رنگ‌ها، افزودنی‌های اصلاح‌کننده. ترکیب این مواد با یک لایه تقویت‌کننده مش الیاف شیشه که در قسمت زیرین آجر انعطاف‌پذیر قرار می‌گیرد، خاصیت انعطاف‌پذیری را به آجر می‌دهد. رنگ‌های آجر نما و بافت آن قابل تغییر بر حسب سلیقه خریدار است [11-12].

محصولات سرامیکی از جمله آجر پلاک معایبی از جمله جرم زیاد و تردی دارند. در مقابل آن محصول نوین آجر انعطاف‌پذیر مزایایی شامل سبکی و قابلیت تغییر شکل ارتجاعی (ناشی از خاصیت کشسانی آن) دارند. به دلیل این مزایا عملکرد آجر انعطاف‌پذیر در برابر نیروهای زمین‌لرزه و دریافت طبقات (ناشی از آن) بهبود می‌یابد.

در این پژوهش، نمونه‌های آجر انعطاف‌پذیر مشابه محصول تولیدکننده‌ای در جمهوری چک در مقیاس آزمایشگاهی فرموله و ساخته شد. آزمایش‌های استاندارد مختلف مرتبط بر روی نمونه‌های ساخته شده با این نوع آجر انجام گردید. در تهیه این آجرها از پلیمرهای بر پایه اکریلیک استر استفاده شد و مواد افزودنی لازم با آنها مخلوط شد. نتایج حاصل حاکی از خواص مناسب فرمولاسیون بومی است. در نمونه بومی از الیاف شیشه برای تقویت و بهبود خواص کششی استفاده شد که استحکام کششی را تا دو برابر افزایش داد، ولی تغییر شکل ناشی از کشش را کم کرد. در نمونه بومی از الیاف شیشه برای تقویت و بهبود خواص کششی استفاده شد که استحکام کششی را تا دو برابر افزایش داد، اما تغییر شکل ناشی از کشش را کم کرد.

مراحل مختلف اجرای این پژوهش شامل مطالعات اولیه و کتابخانه‌ای، تهیه مواد اولیه و طراحی ساخت نمونه‌های آجر نمای انعطاف‌پذیر، ساخت نمونه‌ها شامل آمیزه‌های ماسه و پلیمر و فیلم‌های مربوط، انجام دادن آزمون‌های خواص مکانیکی بر روی نمونه‌ها شامل مقاومت کششی و مقاومت در برابر ضربه و سایر آزمون‌های لازم، بررسی و تحلیل نتایج آزمون‌ها و تهیه گزارش نهایی بود.

۲- مشخصات و اجرای آجر سبک قابل انعطاف

آجر نمای انعطاف‌پذیر بسیار سبک است و وزن هر یک تنها حدود ۶۰ گرم (با ابعاد ۲۴۰ در ۵۰ در ۳ میلی‌متر) است. بنابراین، نیاز به زیرسازی اضافی ندارد. این آجرها مانند اکثر آجرهای نازک، شکننده نیستند و آنها را می‌توان با دست خم کرد. این امر امکان استفاده از آن را برای سطوح منحنی و ناهموار فراهم می‌کند. این آجر در برابر پرتو ماورای بنفش مقاوم است. هنگامی که بر روی یک زیرکار صلب استفاده می‌شود، مقاومت در برابر ضربه را تأمین می‌کند. در محدوده دماهای ۳۸°C تا ۱۰۰°C یکپارچگی و سلامت خود را از دست نمی‌دهد [2-4].

¹ External Thermal Insulation Composite System

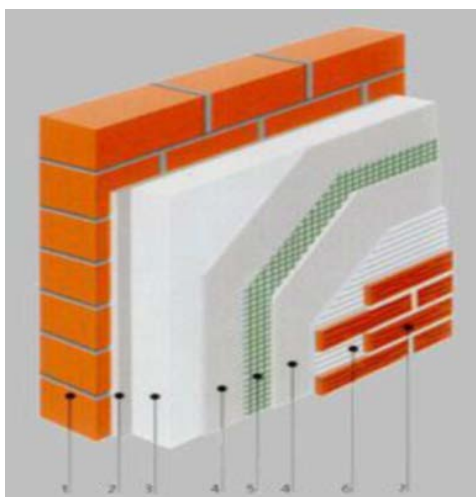
آجرهای نمای انعطاف‌پذیر باید در دماهای بیش از 5°C اجرا شوند. اجرای این نما نیاز به تخصص ویژه‌ای ندارد و با آموزش مختصری قابل انجام است. وسایل مورد نیاز برای نصب آجر انعطاف‌پذیر تنها یک ماله دندانه‌دار، چاقو و برس کوچک است. این آجرها را با شیلنگ آبیاری می‌توان شست. چون آجر انعطاف‌پذیر همراه با سایر اجزا مخلوطی از ترکیبات رزینی اکریلیکی است، نه تنها سبک‌اند بلکه قابلیت انطباق با سطوح منحنی را دارند. پشت باریکه‌ها، اندود زیرین پایه سیمانی مسلح بر روی عایق حرارتی اجرا می‌شود که درجه بالایی از مقاومت در برابر ضربه، مقاومت در برابر عوامل جوی و نفوذپذیری بخار آب را تأمین می‌کند. در جدول ۱ خواص آجر انعطاف‌پذیر و آجر پلاکی متداول با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

جدول ۱ خواص آجر انعطاف‌پذیر و آجر پلاکی متداول

خواص	آجر انعطاف‌پذیر	آجر پلاکی متداول
انعطاف‌پذیری	✓	×
سبکی [*]	✓	×
اجرای سریع و آسان	✓	×
قابل بریدن با قیچی	✓	×
عدم نیاز به بندکشی	✓	×
✓ دارد	×	ندارد

* آجر انعطاف‌پذیر به طور نوعی ۵۰ تا ۶۰ گرم وزن دارد در حالی که وزن آجر نمای رسی ۱ سانتی‌متری بیش از ۲۰۰ گرم و آجر نمای ۲ سانتی‌متری بیش از ۴۰۰ گرم است.

هنگام اجرای سامانه ETICS با آجر نمای انعطاف‌پذیر، زیرکار باید تخت باشد و می‌تواند شامل بنایی آجری، بلوک سفالی، بلوک سیمانی یا مصالح بنایی دیگر باشد. سامانه نمای آجر انعطاف‌پذیر با عایق حرارتی از زیرکار به سطح خارجی شامل اجزای زیر است: دیوار اصلی، چسب سیمانی، عایق حرارتی پلی استایرن منبسط، اندود زیرین سیمانی تقویت‌شده با مش الیاف شیشه، چسب پلیمری و آجر انعطاف‌پذیر. مراحل اجرای سامانه نمای آجر انعطاف‌پذیر با عایق حرارتی به قرار شکل ۲ است.



راهنما: ۱- دیوار اصلی آجری، ۲- چسب سیمانی، ۳- عایق حرارتی پلی استایرن منبسط، ۴- اندود زیرین سیمانی، ۵- مش الیاف شیشه، ۶- چسب پلیمری، ۷- آجر انعطاف‌پذیر

شکل ۲ سامانه نمای عایق حرارتی بیرونی با آجر نمای انعطاف‌پذیر [4]

قدم اول در اجرای آجر نمای انعطاف‌پذیر، تقسیم دقیق سطح به مناطقی است که قرار است آجر روی آن اجرا شود. مقدار کمی از ملات ویژه این نماسازی بر روی سطح خشک و صلب اجرا می‌شود. سپس آجر انعطاف‌پذیر را به داخل چسب می‌فشارند. عرض درزها باید حدود ۱۰ mm باشد (شکل ۱- الف). آجر انعطاف‌پذیر را می‌توان در دور کنج‌ها و سطوح منحنی به کار برد. پس از تنظیم تقسیم‌ها، کار از بالا شروع می‌شود. چسب و ملات بندکشی به طور افقی با ماله دندانه‌دار (با دندانه‌های 6×6 میلی‌متری) در کنج‌های بیرونی اجرا می‌شود. قطعات کنج را به طور محکم درون ملات قرار می‌دهند. اطمینان حاصل می‌شود که این قطعات دو خم شده‌اند (شکل ۱- ب). چسب و ملات بندکشی را در ارتفاع قطعات کنج در مساحتی حدود یک مترمربع اعمال می‌کنند. آجر نمای انعطاف‌پذیر را می‌توان با قیچی یا چاقوی تیز به سادگی برید (شکل ۱- پ). درزها را با قلم موی نقاشی مرطوب صاف می‌کنند. باید اطمینان حاصل شود که آجر به طور کامل در همه وجوه با ملات دربرگرفته شده است (شکل ۱- ت) [6].



ب



الف



ت



پ

شکل ۱ روش نصب آجر انعطاف‌پذیر، الف- نصب بر روی ملات زیرکار، ب- به کار بردن آجر انعطاف‌پذیر به دور کنج‌ها، پ- بریدن آجر انعطاف‌پذیر با قیچی، ت- مسطح کردن درزها با قلم‌موی نقاشی [6]

وزن مجموعه، کمتر از 10 kg/m^2 است. این سامانه در برابر تنش مکانیکی و ضربه مقاومت دارد و تا حدی حرکت سازه‌ای را بدون ترک‌خوردگی امکان‌پذیر می‌سازد. رنگ‌های متداول عبارت‌اند از: قرمز تیره، قرمز، خاکستری، زرد و غیره [6].

با استفاده از سه رزین مختلف، سنگدانه و مواد افزودنی، نمونه‌ها ساخته شد. در جدول ۲ ترکیب نمونه‌های ۱ تا ۵ داده شده است. در همه نمونه‌ها، نسبت اختلاط ۷۱ درصد وزنی ماسه سیلیسی و ۲۹ درصد وزنی چسب بود.

جدول ۲ ترکیب نمونه‌های ۱ تا ۶

کد نمونه	مواد اولیه ملات
S1	رزین پلی اکریلیک و پلی استر و ماسه سیلیسی ریزدانه
S2	رزین پلی اکریلیک و مش الیاف شیشه و ماسه سیلیسی ریزدانه
S3	رزین پلی اکریلیک و تیشو و ماسه سیلیسی ریزدانه
S4	رزین پلی اکریلیک و پلی استر و ماسه سیلیسی ریزدانه
S5	رزین پلی اکریلیک و مش الیاف شیشه و ماسه سیلیسی ریزدانه
S6	رزین اکریلیکی NA58، رزین استایرن بوتادین رابر SBR، رزین اکریلیکی TH110، نفت، ماسه سیلیسی دانه‌بندی شده

در جدول ۲ نمونه شماره S6 شامل مواد زیر بود:

الف) NA58 رزینی اکریلیکی است که سلف کراس لینک (خود شبکه‌ای شونده) است. جذب آب آن کم است، مقاومت خوبی در برابر عوامل جوی دارد، اما انعطاف‌پذیری آن کافی نیست. ب) SBR رزین استایرن بوتادین رابر (لاتکس) برای افزایش انعطاف‌پذیری به مجموعه اضافه شد. مقدار رزین SBR به میزان ۱۰ درصد رزین NA58 به آن اضافه شد. پ) TH110 رزین اکریلیکی است و برای ایجاد حباب هوای ریز از آن استفاده شد. این رزین شکل و قوام بیشتری به قطعه می‌دهد و کمک می‌کند که بعد از شکل‌دهی قطعه تغییر شکل ندهد. ت) نفت به عنوان عامل مانع فوم شدن معمولاً یک دی‌فومر در محیط فوم‌شدگی، نامحلول است و دارای خواص سطحی فعال است. ث) ماده شوینده به عنوان ماده پراکنده‌ساز استفاده شد. ج) ماسه سیلیسی دانه‌بندی شده. در این نمونه NA58، SBR و TH10 جمعاً ۱۸/۸ درصد، ماسه عبور داده شده از الک با چشمه ۱ mm و مانده روی الک ۲۰۰ برابر ۸۰/۲ درصد، نفت ۰/۳ درصد و مایع شوینده ۰/۷ درصد بود.

در این روش ابتدا NA58 و SBR و بعد ماسه سیلیسی در مخلوط‌کن به مدت ۳ دقیقه مخلوط شدند. سپس، TH10 به آن اضافه شد. بعد از آن مقدار نیم درصد وزنی نفت و سپس ۱ درصد وزنی مایع شوینده به مخلوط اضافه گردید. آمیزه آماده شده در مخلوط کن به همان روش قبلی در قالب ریخته شده و بعد از خشک شدن نمونه‌ها در آون آزمون‌های مربوط بر روی آنها انجام گرفت. برای کاهش میزان جذب آب و افزایش نفوذناپذیری از محلول سیلان با نسبت‌های مختلف استفاده شد.

۳-۳-۳ آزمون‌ها

۳-۳-۳-۱- طیف‌سنجی تبدیل فوریه فروسرخ: که به آنالیز FTIR یا اسپکتروسکوپی FTIR نیز شناخته می‌شود، روش تجزیه‌ای است که عموماً برای شناسایی مواد پلیمری استفاده می‌شود. در این روش از نور فروسرخ برای اسکن کردن نمونه و بررسی خواص شیمیایی استفاده می‌شود. هر

به دلیل قابلیت انعطاف و سبکی، نماسازی آجری ساخته شده با آجرهای انعطاف‌پذیر ترک نمی‌خورد، بار ساختمان را تقریباً افزایش نمی‌دهد و کاربرد آن آسان است. آجر انعطاف‌پذیر را می‌توان با تنوعی از رنگ و طرح ساخت. ترکیب آجر انعطاف‌پذیر شامل مواد زیر است: رزین مصنوعی پراکنده در آب، ماسه کوارتزی، رنگ‌ها، افزودنی‌های اصلاح‌کننده. ترکیب این مواد با یک لایه تقویت‌کننده که در قسمت زیرین آجر قرار می‌گیرد، خاصیت انعطاف‌پذیری را به آجر می‌دهد [13].

در تولید آجر نمای انعطاف‌پذیر می‌توان از طرح روستیک یا از ظاهری مشابه آجرهای قدیمی استفاده کرد. از سوی دیگر می‌توان با تغییرات رنگ در بعضی قسمت‌ها از روشن‌تر به تیره‌تر استفاده کرد تا آجر حالت طبیعی بیشتری داشته باشد. در بخش‌هایی از سامانه مرکب عایق حرارتی بیرونی می‌توان از این آجر استفاده کرد و در بقیه بخش‌ها مصالح دیگری مانند سنگ، چوب، سرامیک و غیره به کار برد. به این ترتیب زیبایی کل نما بسیار بیشتر خواهد بود [13].

۳- بررسی‌های آزمایشگاهی

۳-۱- مواد اولیه

برای ساخت نمونه‌ها از مواد اولیه شامل دو نوع چسب اکریلی، مش الیاف شیشه، ورق تیشو، ورق پلی استر، ماسه سیلیسی ریزدانه، گل اخرا و تخته پلی استایرن منبسط استفاده شد. پلی‌استایرن منبسط (چگالی 20 kg/m^3 الی 24 kg/m^3) از کارخانه آذر برفین واقع در تبریز مورد استفاده قرار گرفت. مواد اکریلیک کلسیت و رزین اکریلی استایرن پایه آبی از شرکت زرین فام تهیه شد. افزودنی‌های مورد استفاده عبارت بودند از: Next coat که استر الکلی است، منو اتیلین الکل یا ضدیخ، بیوپل یا ضدقارچ، دنسی‌پل یا ضدکف و تیلوز که برای جمع کردن و یکنواختی مواد ملات مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۳-۲- ساخت نمونه‌ها

ابتدا رزین‌ها و افزودنی‌های مربوط به جز بهبود دهنده‌های ریولوژی در ظرف قرار گرفتند و به کمک همزن پره‌ای با سرعت 120 rpm به مدت ۳ دقیقه مخلوط شدند. در مرحله بعد، پرکننده‌ها به صورت پیمانه‌های حاوی ۲۵ درصد پرکننده کلی به‌تدریج به رزین اضافه شد و تا یکنواخت شدن کامل مخلوط شدند. در انتها، بهبود دهنده ریولوژی به سیستم اضافه و پس از ۲ دقیقه با سرعت 80 rpm فرایند اختلاط خاتمه پیدا کرد.

مراحل تهیه نمونه‌ها با فرمول‌های متفاوت و مواد اولیه مختلف به شرح زیر است: ۱- توزین مواد و مخلوط کردن آنها و تهیه آمیزه، ۲- برش الیاف مش متناسب با ابعاد قالب و آماده‌سازی قالب (استفاده از روغن و ورق سلفون برای جلوگیری از چسبیدن مواد به قالب)، ۳- پوشاندن کف قالب با بخشی از آمیزه، ۴- قرار دادن مش در قالب و پوشاندن روی آن توسط بخش دیگر آمیزه، ۵- صاف کردن سطح نمونه با استفاده از دمپر و قراردادن سمبه درون قالب، ۶- تحت فشار قراردادن مجموعه قالب و نمونه برای اطمینان از یکنواختی و استحکام بیشتر نمونه‌ها، ۷- خارج کردن نمونه‌ها از قالب، ۸- خشک کردن نمونه‌ها، ۹- ساختن نمونه‌های سامانه مرکب عایق حرارتی بیرونی با نمای آجری جهت انجام دادن آزمون‌های مربوط، و ۱۰- آماده‌سازی و تثبیت شرایط نمونه‌های ETICS.



شکل ۳ آزمون مقاومت کششی نمونه‌های آجر انعطاف‌پذیر ساخته شده در آزمایشگاه

مولکول یا ساختار شیمیایی یک رد پای طیفی منحصر به فرد دارد که تجزیه FTIR را ابزار مناسبی برای شناسایی ترکیب شیمیایی پلیمرها می‌سازد.

۳-۳-۲- آزمون تعیین جذب آب: این آزمون مطابق استاندارد ملی ایران شماره ۷۱۲۰ با عنوان "مصلح ساختمانی- فراورده‌های عایق‌کاری حرارتی- تعیین جذب آب کوتاه‌مدت با غوطه‌ورسازی جزئی - روش آزمون" انجام شد. این آزمون، جذب آب ایجاد شده با یک دوره بارندگی ۲۴ ساعته در طی اجرای ساختمان را شبیه‌سازی می‌کند. بخش پائین‌تر یک آزمون برای یک دوره ۲۴ ساعته در آب قرار داده می‌شود و تغییر جرم اندازه‌گیری می‌گردد آزمون‌ها برای حداقل ۶ ساعت در دمای $(23 \pm 5)^{\circ}\text{C}$ قرار گرفتند. سپس با تقریب ۰/۱ گرم برای تعیین جرم اولیه آن، m_0 توزین شدند. آزمون‌ها در حوضچه در زیر آب قرار داده شدند. برای تعیین جرم آزمون‌ها، m_{24} توزین شدند. آب اضافی که به سطح چسبیده ولی جذب آزمون نشده باید قبل از توزین جدا شود. جذب آب، W_a ، بر حسب kg/m^2 با به کار بردن معادله زیر محاسبه شد.

$$W_a = \frac{m_{24} - m_0}{A_p} \quad (۱)$$

که در آن:

m_0 = جرم اولیه آزمون، به kg

m_{24} = جرم آزمون بعد از ۲۴ ساعت غوطه‌وری، به kg

A_p = مساحت سطح زیرین آزمون، به m^2

۳-۳-۳- آزمون چگالی: ابعاد خطی نمونه‌ها مطابق استاندارد ملی ایران شماره ۷۱۱۳ با عنوان "فراورده‌های عایق‌کاری حرارتی برای ساختمان- تعیین طول و عرض- روش آزمون" با دقت ۰/۵ درصد اندازه‌گیری شد. حجم آزمون‌ها با استفاده از این اندازه‌گیری‌ها محاسبه شد. هر آزمون با دقت ۰/۵ درصد توزین و جرم آن به کیلوگرم یادداشت می‌گردد. چگالی ظاهری، به کیلوگرم بر مترمکعب با تقسیم وزن بر حجم نمونه محاسبه شد.

۳-۳-۴- آزمون مقاومت کششی: آزمون اندازه‌گیری میزان مقاومت کششی آجر انعطاف‌پذیر، مطابق استاندارد ASTM D638 انجام شد [14]. دستگاه آزمون کشش قابلیت تنظیم سرعت ثابت فک متحرک به میزان 50 mm/min را داشت. آزمون‌ها به گونه‌ای به فک‌های کششی اتصال داده شد تا از پاره شدن و لغزش آنها جلوگیری شود. تنها نتیجه آزمون‌هایی مورد قبول واقع شدند که عمل پاره شدن از قسمت میانی آزمون‌ها رخ داد. فک‌های دستگاه کشش با ورق لاستیکی پوشش داده شد تا به نمونه‌ها آسیب نرسد. مقادیر مقاومت کششی، TS، به N/mm از رابطه ۳ محاسبه شد.

$$TS = F / W \quad (۳)$$

که در آن:

F نیرو در شکست به N است؛

W عرض آزمون به mm است؛

۳-۳-۵- آزمون مقاومت در برابر فرورفتگی: این آزمون مطابق استاندارد ملی ایران شماره ۱۱۴۲۵ با عنوان "فراورده‌های عایق‌کاری حرارتی- تعیین مقاومت در برابر فرورفتگی سامانه‌های مرکب عایق حرارتی خارجی- روش آزمون" انجام شد. هدف از آزمون تعیین مقاومت در برابر فرورفتگی سامانه‌های مرکب عایق حرارتی خارجی است. مقاومت در برابر فرورفتگی توسط دستگاه آزمون فشاری استاندارد که سرعت ثابت فک بالایی آن در 1 mm/min (± 1) تنظیم شده است و اندازه پیوسته نیرو با قابلیت قرائت ۱٪ نشان می‌دهد اندازه‌گیری شده است. فک‌های مورد نیاز برای این دستگاه فشاری مطابق استاندارد ملی ایران شماره ۱۱۴۲۵ طراحی و ساخته شده است.

۳-۳-۶- آزمون مقاومت در برابر ضربه: این آزمون مطابق استاندارد ملی ایران شماره ۱۱۴۲۶ "تعیین مقاومت در برابر ضربه سامانه‌های مرکب عایق حرارتی خارجی- روش آزمون" انجام شد. در این آزمون به نمونه با انرژی معادل ۲ ژول و ۵ ژول ضربه زده می‌شود.

۴- نتایج و بحث

جهت شناسایی آجر انعطاف‌پذیر خارجی، آزمون FT-IR مطابق استاندارد ASTM E1252-07 [14] تحت عنوان "آیین کار برای روش‌های کلی به دست آوردن طیف فروسرخ برای آنالیز کیفی" بر روی آن انجام شد. در این آزمون مشخص شد که این نمونه دارای (87 ± 2) درصد مواد پرکننده معدنی سیلیکاتی و یک نوع چسب‌بند آکریلاتی است.

در شکل ۴ رفتار تنش- کرنش نمونه‌های آجر نمای انعطاف‌پذیر تجاری خارجی به رنگ‌های زرد و قرمز نشان داده شده است.

است که طولیل شدگی در شکست آن نیز بسیار بیش از بقیه آمیزه‌ها بود (۲/۵ درصد). بقیه مشخصات آمیزه ۶ مانند جذب آب، چگالی، مقاومت فرورفتگی و مقاومت در برابر ضربه نیز در حد قابل قبول و مشابه نمونه خارجی بود. وجود الیاف شیشه در این آمیزه باعث بهبود رفتار مکانیکی نمونه‌ها شد. وجود عامل سیلان باعث کاهش جذب آب نمونه‌های مربوط شد. به‌طور کلی، در بین ۶ ترکیب مختلف مورد بررسی فرمولاسیون آمیزه شماره ۶ بهترین نتیجه را به دست داد.

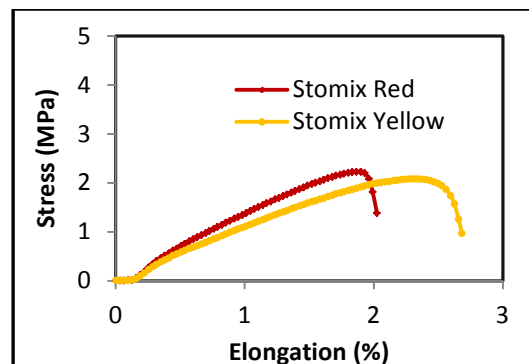
۵- نتیجه‌گیری

آجر نمای انعطاف‌پذیر نسبت به آجر معمولی دارای مزایایی شامل انعطاف‌پذیری، سبکی، اجرای سریع و آسان از جمله قابلیت برش با قیچی است. آزمون FTIR نمونه خارجی آجر انعطاف‌پذیر نشان داد که این نمونه دارای حدود ۹۰ درصد مواد پرکننده ماسه سیلیسی و نوعی چسباننده از جنس آکریلات است. با توجه به این مسأله، نتایج نمونه‌های داخلی آجر انعطاف‌پذیر طراحی و ساخته شدند. با آمیزه‌های مختلف چسباننده پلیمری نمونه‌هایی ساخته شدند. با تغییر مواد افزودنی روند مناسبی در بهبود خواص فیزیکی و مکانیکی نمونه‌ها ایجاد گردید. در تهیه این آجرها از پلیمرهای بر پایه آکریلیک استر استفاده شد و مواد افزودنی لازم با آن مخلوط گردید. نتایج به دست آمده حاکی از خواص مناسب فرمولاسیون بومی است، با این تفاوت که در نمونه بومی از الیاف شیشه برای تقویت و افزایش خواص کششی استفاده شد که مقاومت کششی را تا دو برابر افزایش داد. وجود الیاف شیشه در فرمولاسیون داخلی باعث تفاوت زیاد در رفتار مکانیکی نمونه‌ها شد. وجود عامل سیلان باعث کاهش جذب آب نمونه‌ها شد.

فناوری تولید آجر نمای انعطاف‌پذیر در این مقاله شرح داده شد. مواد اولیه آجر نمای انعطاف‌پذیر یعنی ماسه سیلیسی و چسباننده آکریلاتی در کشور وجود دارد. بنابر این امکان تولید چنین آجرهایی با استفاده از یافته‌های این پژوهش در کشور وجود دارد. افزودنی‌های مورد نیاز در این مقاله معرفی شده‌اند.

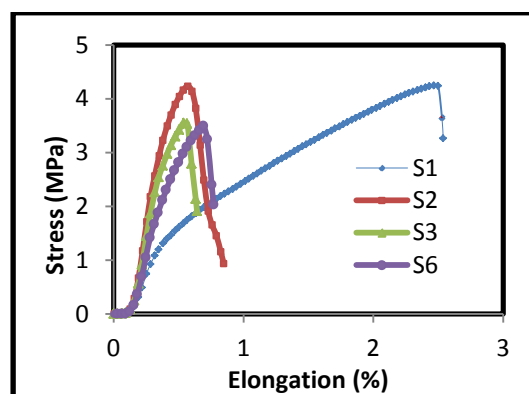
۶- مراجع

- [1] www.spsenviowall.co.uk/products-technical/products/finishes/brick-finish-range/speedyslip
- [2] www.specifiedby.com/sto/stomix-systems-for-social-housing
- [3] www.jub.org.uk/new-bba-flexible-brick-slip
- [4] www.spsenviowall.co.uk/products-technical/products/finishes/brick-finish-range/speedyslip
- [5] www.bimobject.com/en/alsecco/product/collection-eps-acrylic-brick-slips
- [6] www.polantis.com/alsecco/product/collection-eps-acrylic-brick-slips
- [7] www.flexibricksource.com
- [8] www.fischer.uamolda.cz
- [9] www.struchtherm.co.uk
- [10] www.jubrenders.co.uk/jubizol-ewi-flexible-brick-slips-to-masonry
- [11] www.lowes.com/pd/Flexi-Brick-Wheat-2-625-in-x-9-375-in-Individual-Piece-Brick-Veneer/1000347105
- [12] www.stocorp.com
- [13] British Board of Agrément, Agrément Certificate 13/4993, STOMIX EXTERNAL WALL INSULATION SYSTEMS, 2018.
- [14] ASTM D638 – 14, Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics.



شکل ۴ رفتار تنش- کرنش نمونه‌های آجر انعطاف‌پذیر تجاری خارجی به رنگ‌های زرد و قرمز

در شکل ۵ رفتار تنش- کرنش نمونه‌های آجر انعطاف‌پذیر ساخته شده در آزمایشگاه آمده است. مقایسه شکل‌های ۴ و ۵ نشان می‌دهد که نمونه‌های ساخته شده در آزمایشگاه از مقاومت‌های کششی بالاتری در مقایسه با آجر انعطاف‌پذیر تجاری خارجی برخوردار هستند.



شکل ۵ رفتار تنش- کرنش نمونه‌های آجر انعطاف‌پذیر ساخته شده در آزمایشگاه مطابق با جدول ۲

چنانچه ملاحظه می‌شود نمونه‌های خارجی مقاومت کششی نسبتاً پائینی دارند و تا ۲/۲٪ افزایش طول نشان می‌دهند. این در حالی است که نمونه‌های تهیه شده آزمایشگاهی همگی دارای مقاومت کششی تقریباً دو برابر نمونه‌های خارجی هستند، ولی به‌جز یک مورد که به اندازه نمونه‌های خارجی درصد تغییرشکل در پارگی را تحمل کرده است، بقیه در زیر ۱٪ تغییرشکل شکسته شده‌اند.

نتایج رفتار کششی نمونه‌های ساخته شده و نمونه‌های خارجی نیز مطالعه شد. چنان‌که در جدول ۲ ملاحظه می‌شود کلیه نمونه‌های ساخته شده فقط در آزمون ضربه ۲ ژول مورد پذیرش قرار گرفتند. تنها نمونه S1 که یک نمونه بسیار لاستیکی و نرم است، در آزمون ۱۰ ژول مورد قبول بود. حتی نمونه خارجی نیز فقط در آزمون ۲ ژول موفق شد که حاکی از در محدوده قابل قبول بودن نمونه‌ها و فرمولاسیون‌های ساخته شده از نظر آزمون ضربه است. آمیزه ۶ (S6) بالاترین مقاومت کششی را نشان داد. این در حالی



مقایسه بررسی آزمایشگاهی و عددی دیوار برشی فولادی با ورق جان صاف، با ورق جان موجدار عمودی با زاویه ۴۵ درجه

سیده مریم دشتی زند^{۱*}، وحیدرضا کلات جاری^۲، نادر خواجه احمد عطاری^۳

۱. دانشجوی دکتری، مهندسی عمران - سازه، دانشگاه صنعتی شاهرود

۲. دانشیار، مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود، دانشکده عمران، شاهرود

۳. استاد، مهندسی عمران، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، تهران

* پست الکترونیکی: m.dashtizand@shahrood.ac.ir

چکیده

امروزه استفاده از دیوار برشی فولادی به عنوان یک سیستم باربر جانبی در ساختمان‌های فولادی و بتنی مورد توجه قرار گرفته است. توانایی مدل‌سازی عددی دقیق و مبتنی بر رفتار واقعی این دیوارها در تحلیل دقیق سازه دارای دیوار برشی فولادی از اهمیت بسزایی برخوردار است. در این مقاله سعی شده است که صحت‌سنجی نمونه‌های آزمایشگاهی و عددی با یکدیگر مقایسه شود. بدین منظور، ابتدا مدل‌های آزمایشگاهی با بهره گرفتن از نرم‌افزار آباکوس مدل شد و نمونه‌ها با یکدیگر مقایسه گردید. دو نمونه آزمایشگاهی دیوار برشی فولادی با جان صاف و دیوار برشی فولادی با جان ورق موجدار دوزنقه‌ای ۴۵ درجه، قائم با مقیاس یک به سه و نسبت عرض به ضخامت ۱۰۶۶، که در آزمایشگاه سازه مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی تحت بارگذاری چرخه‌ای قرار گرفت. سپس، با بررسی نمودارهای هیستریزس به دست آمده، پارامترهای لرزه‌ای مانند مقاومت، سختی، شکل‌پذیری به دست آمده و با همدیگر مقایسه شده است. با توجه به نتایج به دست آمده، مشاهده شد که تطبیق مناسب بین نتایج آزمایشگاه و نتایج نمونه مدل‌سازی شده وجود دارد و این انطباق دقت نمونه مدل‌سازی شده را تأیید می‌کند.

کلیدواژگان

دیوار برشی موجدار دوزنقه‌ای، سختی، شکل‌پذیری، نرم‌افزار آباکوس، بارگذاری چرخه‌ای

Comparison on Experimental and Numerical Investigation of Steel Plate Shear Wall with Flat Plate, with Vertical Corrugated Plate with 45° Angle

Seyedeh Maryam Dashti Zand^{1*}, Vahid Reza Kalatjari², Nader K. A. Attari³

1. PhD Student, Faculty of Civil Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

2. Associate Professor, Faculty of Civil Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

3. Professor, Road, Housing and Urban Development Research Center (BHRC), Tehran, Iran

* P.O. Box 316, Shahrood, Iran, m.dashtizand@shahroodut.ac.ir

Abstract

Nowadays, the use of steel shear wall as a lateral bearing system in steel and concrete buildings has been considered. The ability of accurate numerical modeling based on the actual behavior of these walls in the accurate analysis of structures with steel shear walls is of great importance. In this article, an attempt has been made to compare the validity of laboratory and numerical samples. For this purpose, laboratory models were first modeled using ABAQUS software and the specimens were compared with each other. Two laboratory specimens of flat shear steel wall and steel shear wall with 45 degree trapezoidal corrugated sheet, vertical with one to three scale and width to thickness ratio of 1066, which were subjected to cyclic loading in the structural laboratory of Road, Housing and Urban Development Research Center. Then, by examining the obtained hysteresis diagrams, seismic parameters such as strength, hardness, ductility are obtained and compared with each other. According to the obtained results, there is a good match between the laboratory results and the results of the modeled sample, and this match confirms the accuracy of the modeled sample.

Keywords

Trapezoidal Corrugated Shear Wall, Hardness, Ductility, Abacus Software, Cyclic Loading

۱- مقدمه

دیوارهای برشی فولادی سیستم‌های مقاوم باربر جانبی جهت به کارگیری در نواحی لرزه خیز زیاد است. این سیستم لرزه‌ای نو که در دنیا رو به گسترش است، برای ساختمان‌های در حال ساخت و مقاوم سازی ساختمان‌های موجود در کشورهای لرزه خیز مانند آمریکا، ژاپن و کانادا مورد استفاده قرار گرفته است. وظیفه اصلی دیوار برشی فولادی مقاومت در برابر نیروهای برشی ایجاد شده در طبقات و لنگر واژگونی حاصل از آن بر اثر زمین لرزه است [۱]. این سیستم در سازه‌ها به صورت‌های مختلف به کار گرفته می‌شود. متداول‌ترین نوع دیوارهای مورد استفاده در ایالات متحده، دیوارهای سخت نشده با جان لاغر است. این دیوارها اساس سیستم دیوار برشی فولادی ویژه هستند و در آیین‌نامه‌های [2] ASCE7 و [3] AISC341 به عنوان "سیستم مقاوم لرزه‌ای پایه" شناخته می‌شوند. این دیوارها به دلیل داشتن نسبت لاغری بالا، مقاومت فشاری کمی دارند. بنابراین، زمانی که نیروی برشی ناشی از زلزله به آنها وارد می‌شود، کماتش برشی در سطح پایینی از نیرو در این نوع از ورق‌ها رخ می‌دهد.

دیوارهای برشی فولادی سخت شده، نوع دوم از این سیستم باربر جانبی هستند که در آنها مقاومت کماتش برشی ورق جان به دلیل استفاده از سخت‌کننده‌ها افزایش یافته است. سخت کردن ورق جان در این حالت می‌تواند به روش‌های مختلفی مثل استفاده از سخت‌کننده‌های قائم، استفاده از سخت‌کننده‌های افقی، استفاده از ترکیب سخت‌کننده‌های قائم و افقی، افزودن بتن مسلح شده به یک یا هر دو وجه دیوار (دیوار برشی فولادی مختلط) و غیره صورت بگیرد. سخت کردن ورق جان تأثیر مناسبی روی مقاومت و سختی دیوار دارد. وجود سخت‌کننده موجب کاهش مقاومت و سختی مورد نیاز اجزای مرزی و بهبود رفتار هیستریزس دیوار می‌شود، ولی باعث افزایش قیمت و ضخامت دیوار می‌گردد [۴]. مهمترین پارامترهایی که در انتخاب یک سیستم مقاوم در برابر بارهای جانبی نقش دارند عبارت‌اند از: سختی، مقاومت و شکل پذیری. ارزیابی رفتار و عملکرد دیوار برشی فولادی در مقایسه با سایر سیستم‌های لرزه‌ای بیانگر رفتار مناسب آن است. بنابراین، استفاده از دیوار برشی فولادی به دلیل سختی مناسب در کنار شکل پذیری بالا در مقابل بارهای جانبی و قابلیت استهلاک انرژی لرزه‌ای و رفتار هیستریزس پایدار و به دلیل سادگی در ساخت و سرعت اجرای بالا و وزن کم و سبکی، هزینه کم [۵] از یک ایده به یک سیستم باربر جانبی مورد قبول آیین‌نامه‌ها تبدیل شده و حتی قبل از پیدایش ضوابط آیین‌نامه‌ای جدید در صنعت ساختمان سازی مورد استفاده قرار گرفته است. مدل سازی اجزای محدود دیوارهای برشی سخت نشده در تعدادی از مقالات ارائه شده است که می‌توان به کارهای انجام شده توسط الگالی و همکاران [۶] و درایور و همکاران [۷] اشاره کرد. در مورد دیوارهای سخت شده نیز تحقیقاتی انجام شده است. در این مورد می‌توان به بررسی رفتار سیکلیک، قابلیت تغییر شکل و سختی سیستم توسط علی‌نیا و دستفان [۸]، بررسی آزمایشگاهی و تحلیلی دیوارهای برشی سخت شده توسط صبور قمی و سجادی [۹]، طراحی سخت‌کننده‌های دیوارهای برشی فولادی توسط علی‌نیا و صراف شیرازی [۱۰] و بررسی رفتار دیوارها تحت فشار و خمش توسط گروندین و همکاران [۱۱] اشاره کرد. نخستین پژوهش در زمینه رفتار کماتشی ورق‌های موجدار برشی در اواخر دهه ۶۴ میلادی توسط ایسلی و مک فارلند [۱۲] انجام پذیرفت. پس از آن، مطالعات نظری و آزمایشگاهی فراوانی در زمینه رفتار کماتشی و مقاومت ورق‌های موجدار در جان تیر ورق‌ها توسط الگالی و همکاران [۱۳]، احمد [۱۴]، و بی [۱۵] و همکاران صورت گرفت. بررسی

رفتار دیوارهای برشی فولادی با ورق‌های موجدار دوزنقه‌ای توسط بوتروس [۱۶] نشان داد، دیوارهای برشی فولادی با ورق‌های موجدار دارای ظرفیت باربری، شکل پذیری و اتلاف انرژی بیشتری نسبت به دیوارهای با ورق‌های صاف هستند. میرقادر و همکاران [۱۷] با مدل سازی سه بعدی دیوار با استفاده از روش اجزای محدود غیرخطی رفتار و کاربرد دیوارهای برشی فولادی موجدار را مورد ارزیابی قرار دادند.

علایی و همکاران [۱۸] رفتار ورق صاف در ضخامت‌های متفاوت و ورق موجدار در ضخامت، زاویه موج و تعداد نیم موج متفاوت تحت بار سیکلیک را با استفاده از نرم افزار اجزای محدود ANSYS و با در نظر گرفتن تحلیل غیرخطی هندسه و مصالح مورد بررسی قرار دادند.

کلاتری و همکاران [۱۹] در پژوهش انجام شده رفتار و عملکرد دیوارهای برشی فولادی در حالت‌های سخت نشده، موجدار افقی، موجدار عمودی، تقویتی ورق موجدار افقی با دو ورق صاف و تقویتی ورق موجدار عمودی با دو ورق صاف (همگی با مصرف مصالح یکسان) برای قاب سه طبقه و یک دهانه و در مقیاس واقعی با نرم افزار آباکوس مدل سازی شده و تحت بارگذاری ثقلی و لرزه‌ای مورد بررسی قرار دادند. نتایج بیانگر این است که اتصال بین ورق‌های جان تأثیر بسیار مطلوبی بر عملکرد این نمونه‌های تقویتی دارد.

تیپینگ و استوجادینوویچ [۲۰] آزمایش‌هایی را بر روی ۴۴ مدل مختلف دیوارهای برشی فولادی موجدار دوزنقه‌ای یک طبقه انجام دادند. ورق‌های مورد آزمایش با پیچ به قاب پیرامونی متصل شده بودند. همچنین، ضخامت ورق‌های سرد نورد مورد استفاده بسیار کم بود. از این رو خرابی دیوارها بیشتر در محل پیچ‌ها اتفاق افتاد و دیوارها وارد مرحله پس کماتش نشدند. ایشان در این پژوهش به بررسی ابعاد و اندازه ورق، شکل ورق و نوع قید و بست‌ها پرداختند. ضریب رفتار پیشنهادی آنها برای این نوع دیوار ۵/۵ بوده است. همچنین، این سامانه باعث افزایش ظرفیت برشی دیوار برشی می‌گردد.

مدل دیگری که مورد بررسی قرار گرفته است، کار تحقیقاتی اخوان سیگاری یزدی و همکاران [۲۱] با استفاده از روش اجزا محدود و نرم افزار اجزا محدود آباکوس مدل‌هایی را که در آزمایشگاه مورد مطالعه قرار داده بود، شبیه سازی کرد. این نمونه‌ها دارای مقیاس یک به سه و چیدمان آزمایش و مشخصات مصالح مطابق با نمونه آزمایشگاهی انجام شده است. در این تحقیق اطلاعات دقیق ابعاد و مشخصات مصالح قبل از انجام دادن آزمایش اندازه گیری و گزارش شده است. در مطالعات تحلیلی، از سخت شدگی ترکیبی برای مدل سازی رفتار غیرخطی فولاد نرمه استفاده شده و ویژگی‌های الاستیک فولاد نرمه همسانگرد فرض شده است. برای اعمال نقص اولیه در مدل، در گام اول ۱۰ میلی متر جابه جایی خارج صفحه در وسط ورق هر طبقه اعمال شده و سپس بارگذاری جانبی وارد شده است.

در این مقاله دو نمونه ساخته و آزمایش شده در آزمایشگاه بخش سازه مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی در نرم افزار آباکوس مدل سازی و مورد مقایسه قرار گرفت.

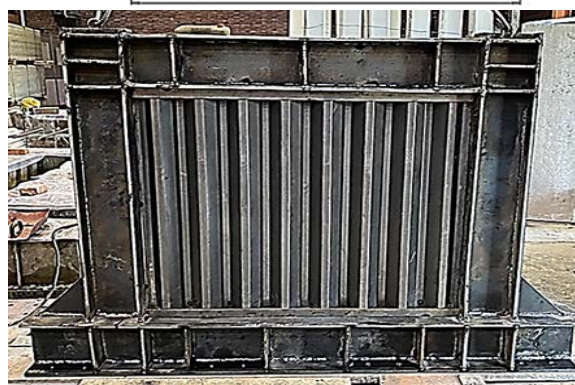
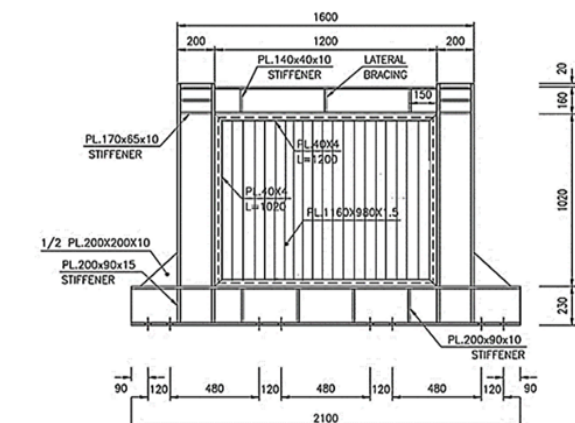
۲- مشخصات نمونه‌های آزمایشگاهی

مشخصات نمونه دیوار برشی فولادی صاف "SPSW" در شکل ۱ و نمونه دیوار برشی فولادی موجدار دوزنقه‌ای، "CSPSW" مورد آزمایش در شکل ۲ نشان داده شده است. ورق جان دیوار برشی فولادی با زاویه ۴۵ درجه مطابق با شکل ۳ ساخته شده است. نمونه با مقیاس یک سوم و در یک قاب یک طبقه و یک دهانه ساخته شده و تحت بار چرخه‌ای قرار گرفته

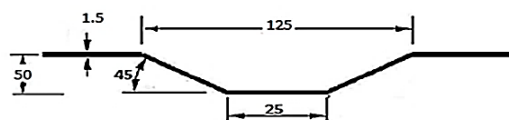
است. خصوصیات مکانیکی اعضای نمونه‌های آزمایشگاهی در جدول ۱ آورده شده است. نوع فولاد بر اساس استاندارد DIN آلمان ST37 است [۲۲].

جدول ۱ مشخصات مکانیکی مصالح

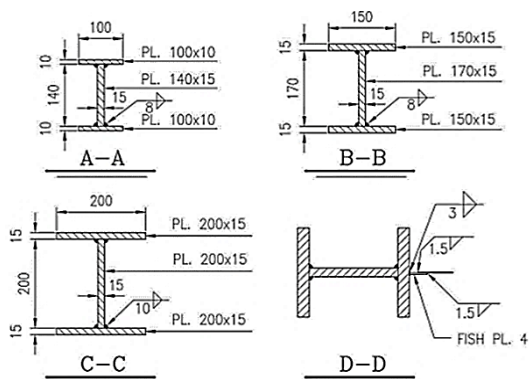
ورق اعضا	مدول یانگ E (GPa)	تنش تسلیم f_y (MPa)	تنش حداکثر f_u (MPa)	$\frac{f_u}{f_y}$
ورق جان (mm ۱/۵)	۲۱۰	۲۴۲	۳۳۹	۱/۴۰
ورق اتصال (mm ۴)	۲۱۰	۲۶۰	۳۷۴	۱/۴۳
ستون و تیر (mm ۱۰)	۲۱۰	۳۵۰	۴۳۵	۱/۲۴
ستون و تیر (mm ۱۵)	۲۱۰	۳۸۵	۴۸۰	۱/۲۵



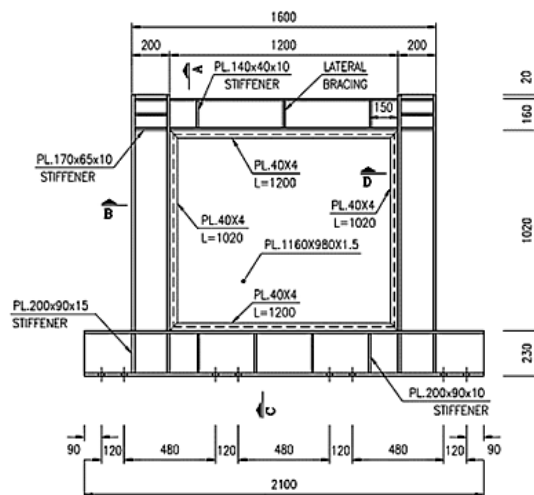
شکل ۲ نمونه "CSPSW"



شکل ۳ اندازه گذاری ورق دوزنقه ای (mm)



شکل ۴ جزئیات مقاطع تیر و ستون‌ها و اتصالات (mm)

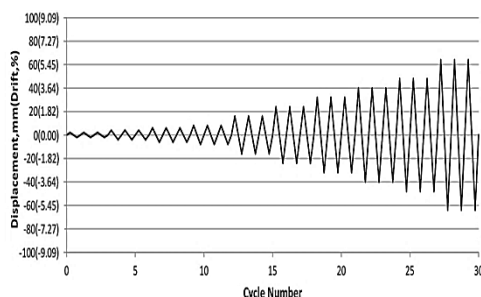


شکل ۱ نمونه "SPSW"

۴- سیستم بارگذاری

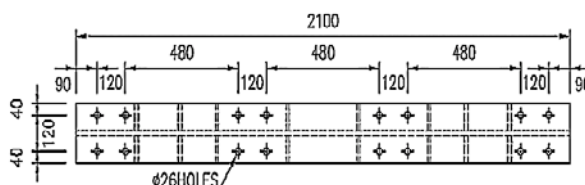
برای بررسی رفتار لرزه‌ای تحت اثر زلزله، لازم است بار زلزله یا مشابه آن به سازه وارد شود. بارگذاری جانبی در این مطالعه، از روش بارگذاری جانبی شبه استاتیکی سیکلی افزاینده استفاده شد. برای شبیه‌سازی بار زلزله و همچنین بررسی رفتار رفت و برگشتی نمونه، پروتکل [23] ATC-24 به کار گرفته شده است. بارگذاری به صورت کنترل جابه‌جایی انجام می‌شود و دامنه بارگذاری به صورت متغیر (افزاینده- کاهنده) در نظر گرفته شده است و بارگذاری در قسمت تیر فوقانی اعمال می‌شود. جهت جلوگیری از کمانش جانبی، جابه‌جایی تیرها در صفحه عمود بر صفحه بارگذاری با استفاده از مهار جانبی کنترل شده است. برای شبیه‌سازی زلزله و بررسی دقیق رفتار چرخه‌ای دیوارهای برشی فولادی از بارگذاری شبه استاتیکی با افزایش بار و جابه‌جایی در هر چرخه استفاده شده است. برای اعمال این بارگذاری جانبی، از سیستم هیدرولیک دستی استفاده شد. این سیستم دارای پمپ دستی مجهز به ترمینال تقسیم‌کننده فشار هیدرولیکی، شیلنگ‌های فشار قوی و دو جک هیدرولیکی فشاری ۱۰۰ کیلو نیوتنی است. از آنجا که جک‌های هیدرولیکی مورد استفاده از نوع فشاری بودند، لذا برای اعمال بارگذاری رفت و برگشتی، ابتدا در هر طرف نمونه یک قاب صلب فولادی که توسط پیچ‌های پر مقاومت به کف صلب آزمایشگاه متصل می‌شود، قرار داده شد. دو نشیمن‌گاه فولادی ساخته شد و به قاب‌های صلب متصل شد تا جک‌های هیدرولیکی بر روی آنها قرار بگیرند. این مجموعه مقاوم نقش تکیه‌گاه جک‌های هیدرولیکی را دارد که نیروهای افقی را به نمونه آزمایشگاهی اعمال می‌کنند.

برای آنکه در حین آزمایش نیروی وارده به دیوارها توسط جک‌ها همواره در راستای افقی باشد، بار افقی با استفاده از دو جک هیدرولیکی اعمال شد. برای جلوگیری از حرکت خارج از صفحه دیوارها در حین آزمایش، از دو پروفیل I شکل استفاده شد که به هم متصل بودند و در دو طرف تیر بارگذاری با فاصله اندکی قرار گرفتند. همان‌طور که اشاره شد، جک‌های اعمال نیرو از نوع فشاری بودند و توانایی اعمال نیروهای کششی را نداشتند. از این رو هنگام اعمال بار جانبی توسط هر یک از جک‌ها، بایستی جک دیگر به عقب کشیده می‌شد تا مزاحمتی برای حرکت جانبی دیوار ایجاد ننماید. همچنین، در حین آزمایش‌ها مشاهده شد که این روش باعث گردید که حرکت دیوارها کاملاً داخل صفحه باشد و حرکت خارج از صفحه‌ای اتفاق نیفتد. بارگذاری سیکلی به صورت کنترل‌شونده توسط تغییر مکان در آمد که در آن، هر سیکل بارگذاری با دامنه تغییر مکانی مشخص، ۳ بار تکرار شد [۲۲].



Uniaxial Strain Gauge

شکل ۷ پروتکل بارگذاری با کنترل جابه‌جایی

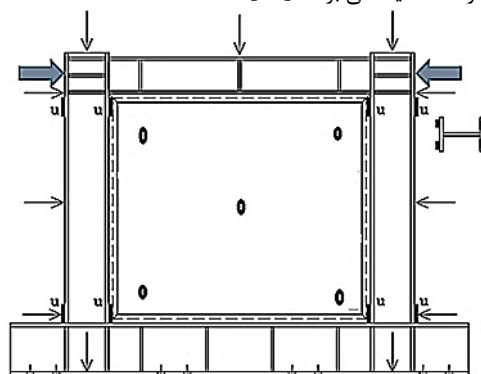


شکل ۸ جزئیات اتصال نمونه به کف آزمایشگاه

نمونه‌ها پس از ساخت، بین دو پایه قائم موجود در آزمایشگاه قرار گرفته و جک‌های هیدرولیکی، بار و جابه‌جایی مورد نظر را در تراز تیر فوقانی نمونه به آن وارد می‌کند. همچنین، موقعیت پروفیل‌هایی که تأمین‌کننده مهار جانبی تیر فوقانی در نمونه‌هاست، از تغییر شکل خارج از صفحه آن جلوگیری می‌کند.

۳- ابزاربندی نمونه‌ها

برای مطالعه رفتار هر دیوار در حین آزمایش، لازم است اطلاعات مورد نیاز اندازه‌گیری و ثبت شود. مهمترین داده‌هایی که در شناخت رفتار دیوارها نقش تعیین‌کننده‌ای دارد و در این پژوهش به آنها پرداخته شد، عبارت‌اند از: نیرو، تغییر مکان و کرنش. همچنین، در این مطالعه نحوه توزیع ترک و گسترش آنها در دیوارهای برشی فولادی در مراحل مختلف بارگذاری، برداشت شده است. برای اندازه‌گیری تغییر مکان‌های دیوار در نقاط حساس، از جابه‌جایی‌سنج‌های الکتریکی استفاده شد. با توجه به اینکه با ابزارهای موجود، اندازه‌گیری تنش به صورت مستقیم امکان‌پذیر نیست، اندازه‌گیری کرنش اهمیت پیدا می‌کند. با اندازه‌گیری کرنش و با استفاده از روابط موجود در مکانیک مصالح، مقدار تنش قابل محاسبه است. برای نمونه‌های مورد مطالعه این کرنش‌سنج‌ها روی بال ستون‌ها و به موازات لبه بال استفاده شده است. در مقاطع فوقانی و تحتانی هر ستون از ۸ کرنش‌سنج تک محوری استفاده شده است (شکل ۶). نیروها، تغییر مکان‌ها و کرنش‌ها همگی توسط یک سیستم جمع‌آوری اطلاعات ثبت و نگهداری شدند. دستگاه ثبت داده‌ها از مدل TDS 601 ساخت شرکت TML ژاپن در این پروژه مورد استفاده قرار گرفت. ابزارهای الکتریکی اندازه‌گیری شامل نیروسنج‌ها، جابه‌جایی‌سنج‌ها و کرنش‌سنج‌ها به وسیله کابل‌های چند سیمی به صورت منظم و طبق یک شماره‌گذاری مشخص، به جعبه سوئیچ روی دستگاه وصل شدند و در هنگام آزمایش، مقادیر آنها مرتب ثبت گردید تا نمونه به مرحله گسیختگی برسد [۲۲].



Uniaxial Strain Gauge

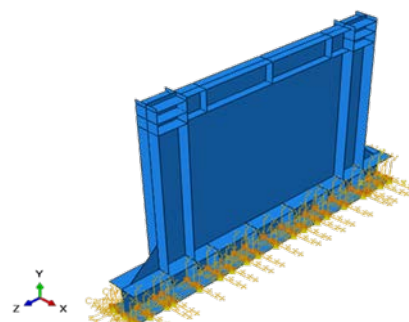
LVDT

شکل ۹ ابزاربندی روی نمونه

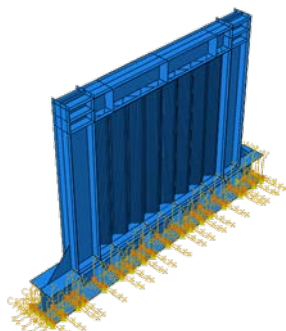
۵- اصول مدل سازی و بارگذاری نمونه ها

با استفاده از امکانات تعبیه شده در ماژول پارت^۱ نرم افزار آباکوس، طراحی هندسه نمونه ها انجام گردید. در این ماژول، اجزای مختلف نمونه ها شامل تیرها، ستون ها، ورق فولادی دیوار برشی صاف و موجدار، سخت کننده های تیرها و ستون ها، کف صلب آزمایشگاه و ورق های مثلثی پای ستون ها با ابعاد مشخص خود به طور جداگانه و تحت عنوان یک پارت به صورت یک المان سه بعدی از نوع شل^۲، برحسب نوع کاربردشان در مدل سازی شکل پذیر^۳ یا صلب^۴، ترسیم و طراحی شد. با توجه به عرض کم ورق های اتصال^۵ در مدل اجزای محدود، ورق جان مستقیماً به المان مرزی اتصال داده شد. مدل سازی اجزای قاب با استفاده از مدل سازی صریح آنها به صورت اجزای ساخته شده از ورق انجام شده تا مفاصل پلاستیک و کمانش های موضعی اجزای مختلف در مدل قابل مشاهده باشد. اتصال تیر تحتانی به کف قوی در آزمایشگاه مطابق با شکل ۸ با پیچ صورت گرفته است. در نتیجه امکان اتصال پیوسته آنها وجود نداشته، بنابراین در خصوص نیروهای کششی و فشاری پای نمونه، در محل اتصال پیچ ها، فترهایی با سختی برابر با AE/L_b برای هر پیچ در نظر گرفته شده است (A؛ سطح مقطع، E؛ مدول الاستیسیته و L_b ؛ طول گیر پیچ است).

در مدل سازی نمونه ها در نرم افزار یک ورق شکل پذیر به ابعاد $30 \times 200 \times 210$ میلی متر نمونه را به کف آزمایشگاه متصل می کند. سپس در ماژول مربوط به بارگذاری با انتخاب این عضو که از قبل به عنوان یک مجموعه برای نرم افزار معرفی شده، حرکت ها و دوران ها را در هر سه جهت برابر صفر قرارداده شد تا با این روش صلبیت به ورق کف آزمایشگاه اعمال شود.



الف - SSPW



ب - CSPSW

شکل ۸ مدل سازی پیچ ها در محل اتصال نمونه به کف صلب آزمایشگاه

دیوار برشی فولادی شامل تیر، ستون (المان مرزی) و ورق نازک جان است. اعضای مرزی و ورق جان با استفاده از المان های چهارگره ای S4R که یک المان پوسته ای (shell) کامل است، مدل سازی شده است. المان S4R، قابلیت مدل سازی رفتار غیرخطی هندسی و غیرخطی مواد و همچنین، انتگرال گیری عددی در راستای ضخامت پوسته را دارد. بهره گیری از روش انتگرال گیری کاهش یافته می تواند اطلاعات دقیقی را به کاربر بدهد و در مقایسه با روش انتگرال گیری کامل، زمان پردازش توسط کامپیوتر را کاهش دهد. مدل سازی رفتار پوسته های نازک و ضخیم با استفاده از این المان امکان پذیر است. همچنین، از سخت شدگی کینماتیک برای نمایش رفتار ورق جان و اعضای قاب در حالت پلاستیک و سخت شدگی کینماتیک باعث جابه جایی سطوح تسلیم بدون گسترش آن در طول کرنش پلاستیک شده و برای تحلیل های بار افزون مناسب است. مشخصات سخت شدگی کینماتیک مصالح مورد استفاده در مدل سازی، با استفاده از تنش واقعی (تنش کوشی) و کرنش لگاریتمی در نظر گرفته شده است. مدل سازی اجزای قاب پیرامون دیوار، با استفاده از مدل سازی صریح آنها به صورت اجزای ساخته شده از ورق انجام شد تا امکان مشاهده مفاصل پلاستیک و کمانش های موضعی اجزای مختلف در مدل فراهم شود. همچنین، تأثیر مقدار تغییر شکل اولیه ورق جان و اندازه مش بر رفتار نمونه بررسی و مشخص شد که مقدار تغییر شکل اولیه ورق جان تأثیر ملموسی در رفتار نمونه ندارد، اما با کوچکتر کردن اندازه مش دقت نتایج بالا می رود. دقت مش بندی به نحوی در نظر گرفته شد که خطا در محاسبه برش پایه کمتر از ۵ درصد باشد. در این تحقیق، از کاهش مقاومت و خرابی پس از دستیابی به مقاومت پلاستیک برای ورق ها و اعضای مختلف در مدل سازی به دلیل نیاز به تکنیک های خاص مدل سازی و افزایش زمان تحلیل، صرف نظر شده است. شایان ذکر است در تحلیل های متعارف المان محدود، مدل سازی خرابی ها در نظر گرفته نمی شود. برای اعمال بار جانبی و بررسی رفتار نمونه ها در آزمایشگاه، چک های هیدرولیکی در تراز فوقانی نمونه قرار داده شد و بارگذاری بر اساس پروتکل [23] ATC-24 بر نمونه ها وارد شد.

در مدل سازی نمونه ها، بارگذاری جانبی به صورت چرخه ای معکوس شونده (شبه استاتیکی) و مطابق با الگوی نمونه های آزمایشگاهی انجام شد. برای اعمال بار جانبی در نرم افزار، از گزینه Amplitudes الگوی بارگذاری به برنامه معرفی شد. سپس، در ماژول مربوط به بارگذاری، با انتخاب محل اعمال بار که به عنوان یک مجموعه به نرم افزار معرفی شده است، الگوی بارگذاری مورد نظر به نمونه اعمال گردید. با توجه به اینکه از شکل اولیه ورق های جان

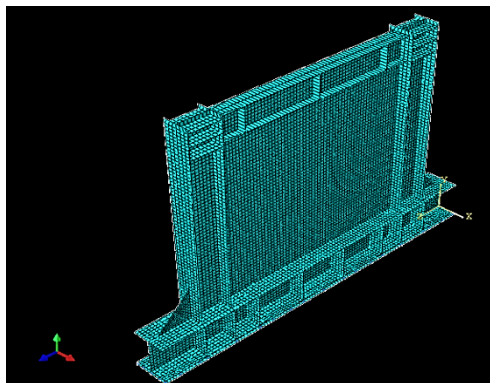
1 Part

2 Shell

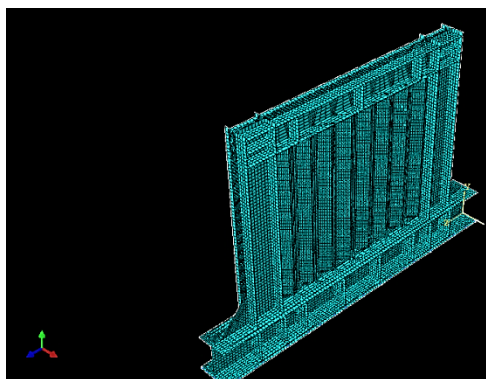
3 Deformable

4 Discrete Rigid

5 Fish Plate



الف - SSPW

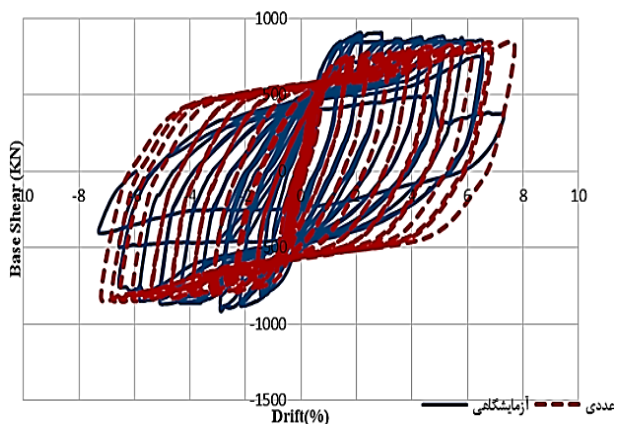


ب - CSPSW

شکل ۱۰ مش بندی نمونه های مدل سازی شده

۶-۱- منحنی هیستریزیس آزمایشگاهی و تحلیلی

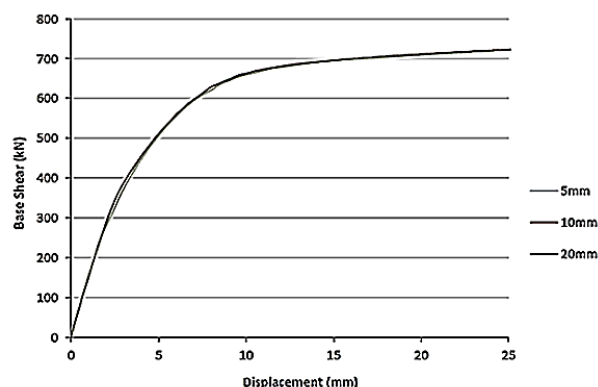
در شکل ۱۱ (الف و ب)، منحنی پاسخ هیستریزیس تحت بار چرخه ای علاوه بر تحلیل بار افزون انجام شده که نتایج آن و مقایسه نمونه های تحلیلی با رفتار آزمایشگاهی برای هر نمونه دیوار فولادی ساده و موجدار نشان داده شده است.



الف - SSPSW

پیش از بارگذاری در آزمایشگاه اطلاعاتی وجود نداشت، اعمال تأثیر میزان خطای ساخت و تغییر شکل اولیه ورق های جان در مدل سازی نمونه ها مهم است. به طور کلی، تغییر شکل های خارج از صفحه جزیی ورق جان به دلیل فرآیند ساخت و نصب، حمل و نقل، ضخامت کم ورق جان، جوشکاری و اتصال اعضای مختلف باعث کمانش و تغییر شکل ورق جان می گردد، بنابراین، این عیوب باید در مدل المان محدود نمونه ها لحاظ گردد.

برای لحاظ کردن عیوب اولیه، تحلیل کمانشی مقدار ویژه نمونه ها انجام شد تا مود اول کمانشی ورق جان پیش از اعمال بارگذاری جانبی مشخص گردد. مود اول کمانشی ورق جان، در یک جابه جایی کم ضرب شد و به عنوان شرایط اولیه نمونه در تحلیل بار افزون مورد استفاده قرار گرفت. برای تعیین مقدار مناسب تغییر شکل اولیه خارج از صفحه ورق جان و همچنین اعمال تغییر شکل های اولیه ناشی از خطای ساخت و غیره، سه مقدار ۵، ۱۰ و ۲۰ میلی متر به عنوان تغییر شکل های خارج از صفحه در شکل مود اول کمانشی ورق جان نمونه SPSW ضرب شد. تحلیل بار افزون نمونه اول با سه مقدار تغییر شکل اولیه انجام شد. همان طور که در شکل ۹ مشاهده شد، مقدار تغییر شکل اولیه اثر ناچیزی بر رفتار سیستم دارد و منحنی تغییر شکل های اولیه با مقادیر مختلف، بر هم منطبق است. علت این است که با اعمال جابه جایی جانبی به نمونه، ورق جان کمانش می کند و تأثیری از شکل اولیه ورق جان نمی پذیرد. بنابراین، در کلیه نمونه های مدل سازی شده با انتخاب مجموعه ای از گره های ورق جان و در نظر گرفتن حرکت بیرون از صفحه به میزان ۱۰ میلی متر، عیوب اولیه ورق در تحلیل نمونه ها در نظر گرفته شد.

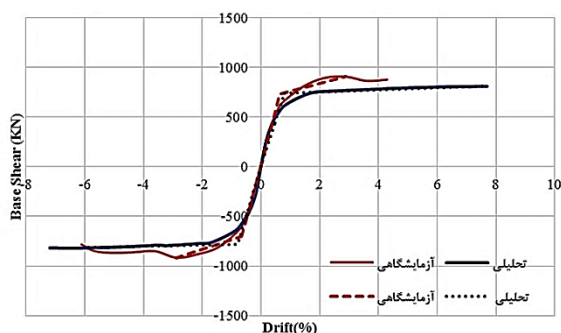


شکل ۹ اثر تغییر شکل اولیه ورق جان بر منحنی نیرو- جابه جایی

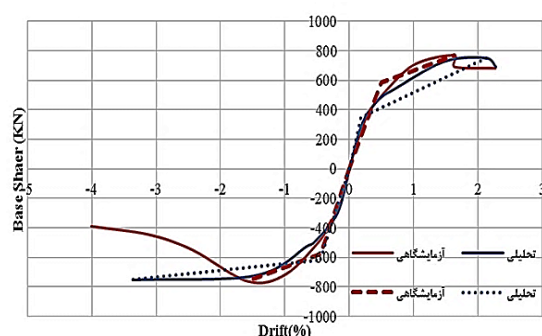
در تنظیمات مربوط به مش بندی نمونه ها در نرم افزار، هم اعضای مرزی و هم ورق جان با استفاده از المان های چهار گره ای S4R که یک المان شل کامل است مدل سازی شده اند (شکل ۱۰).

۶-۲ تحلیل رفتار مدل ها و مقایسه با نتایج آزمایشگاهی

بعد از آزمایش و مدل سازی نمونه ها، رفتار دیوارهای برشی فولادی به وسیله مقایسه پارامترهای عملکردی شامل سختی اولیه و مؤثر، مقاومت، با نتایج دیوارهای فولادی موجدار دوزنقه ای عمودی با زاویه ۴۵ درجه عمودی ارزیابی شد.



الف - SPSW



ب - CSPSW

شکل ۱۳ منحنی‌های Backbone حاصل از نتایج نمونه‌های آزمایشگاهی و تحلیلی (خطوط ممتد) و چندخطی برازش شده بر آن (خطوط منقطع)

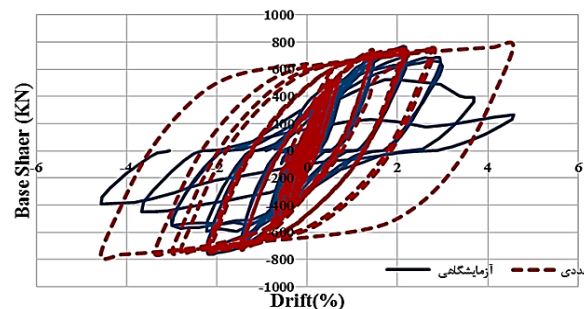
۳-۶- مقایسه سختی و مقاومت و شکل پذیری

در جدول ۲ مقایسه سختی اولیه، سختی مؤثر، حداکثر مقاومت برشی و حداکثر مقاومت تسلیم برای نمونه‌ها نشان داده شده است. در این مقایسه، اختلاف بین مقادیر مربوط به سختی اولیه، سختی مؤثر، حداکثر مقاومت برشی و مقاومت تسلیم به صورت درصد ارایه شده است. علامت‌های مثبت و منفی در ستون تفاوت به ترتیب نشان‌دهنده افزایش و کاهش در میزان پارامتر مورد نظر برای یک نمونه تحلیلی نسبت به نمونه آزمایشگاهی در نظر گرفته شده است.

جدول ۲ مقایسه مشخصات سازه‌ای محاسبه شده نمونه‌های آزمایشگاهی با تحلیلی

نمونه	سختی اولیه (KN/mm)		تفاوت (%)
	تحلیلی	آزمایشگاهی	
SPSW	۱۳۴/۰۱	۱۱۳/۸۹	+۱۷
CSPSW	۱۴۶/۱۳	۱۵۱/۳۲	-۳

نمونه	سختی مؤثر (KN/mm)		تفاوت (%)
	تحلیلی	آزمایشگاهی	
SPSW	۸۵/۳۰	۹۹/۹۶	-۱۷
CSPSW	۱۵۰/۵۷	۱۱۲/۶۴	+۳۳



ب - CSPSW

شکل ۱۱ مقایسه نتایج منحنی‌های هیستریزس نمونه‌های آزمایشگاهی (خطوط ممتد) با نمونه‌های تحلیلی (خطوط منقطع)

۲-۶- چندخطی سازی رفتار نمونه‌های آزمایشگاهی و تحلیلی

برای مقایسه برخی خواص نمونه‌ها، مانند: سختی، مقاومت اولیه و مقاومت مؤثر، لازم است تا منحنی چندخطی نیرو-جابجایی بر منحنی پش هر یک از نمونه‌ها برازش داده شود. طبق آیین‌نامه [۲۴] ASCE41-17 برای محاسبه مقادیر سختی و مقاومت رسم منحنی سه خطی خواهد بود. خط اول منحنی چندخطی نیرو-جابجایی از مبدأ شروع شده و شیبی برابر با سختی جانبی مؤثر، K_e دارد. سختی جانبی مؤثر، K_e برابر است با سختی محاسبه شده برای نمونه در نیرویی معادل ۶۰٪ مقاومت تسلیم مؤثر سازه. مقاومت تسلیم مؤثر V_y نباید بزرگتر از برش پایه حداکثر قرائت شده در منحنی نیرو-جابجایی در هیچ نقطه‌ای باشد. خط دوم باید نمایانگر شیب مثبت پس از تسلیم باشد. این شیب با ترسیم خطی بین (V_d, Δ_d) و نقطه‌ای از خط اول به دست می‌آید به نحوی که سطح زیر منحنی واقعی با منحنی دو خطی حاصل با هم برابر باشد.

(V_d, Δ_d) نقطه‌ای روی منحنی رفتار واقعی نمونه است که بیانگر نقطه هدف جابه‌جایی یا جابه‌جایی معادل با حداکثر برش پایه هر کدام است که کمتر باشد.



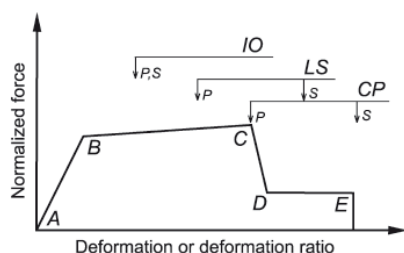
شکل ۱۲ چندخطی سازی رفتار نمونه‌ها طبق آیین‌نامه ASCE41-17

برای مقایسه کمی نتایج تحلیلی و آزمایشگاهی، منحنی‌های Backbone حاصل از آزمایش نمونه‌ها و چندخطی برازش شده بر آن، براساس روش آیین‌نامه ASCE41-17 از نتایج آزمایشگاهی نمونه‌ها با نتایج تحلیلی تحت بار چرخه‌ای در شکل ۱۳ ارایه شده است. شایان ذکر است مدل سازی خرابی نمونه‌ها و بررسی آن، در این مقاله در نظر گرفته نشده است. نتایج آزمایشگاهی و تحلیلی پارامترهایی مانند: سختی اولیه، سختی مؤثر و مقاومت نهایی نمونه‌ها با یکدیگر مقایسه شده است.

تسلیم آنهاست، به عنوان معیاری برای تعیین مقدار تغییر شکل های غیر خطی ایجاد شده در اعضا استفاده می شود.

ضریب اصلاح مورد استفاده در معیار پذیرش اعضا و اجزای کنترل شونده، به وسیله تغییر شکل شناخته می شود که مبین قابلیت شکل پذیری جزء است و m نام دارد.

نحوه محاسبه ضریب m بر اساس دستورالعمل ASCE41-13 [25]، در شکل ۱۴ نشان داده شده است. برای محاسبه ضریب m، ابتدا مقدار مجاز تغییر شکل برای حد آستانه فروریزش (CP) محاسبه می گردد (فرمول ۱) و سپس، نسبت این تغییر شکل به تغییر شکل متناظر با تسلیم تقسیم می شود. با ضرب کردن ضریب ۰/۷ در نسبت به دست آمده، مقدار ضریب m برای حد ایمنی جانی (LS) به دست می آید (فرمول ۲). مقدار ضریب m برای حد خدمت رسانی (IO) نیز از حاصل ضرب ۰/۶۷ در مقدار حد ایمنی جانی به دست می آید (فرمول ۳).



شکل ۱۴ پارامترهای مورد نیاز برای محاسبه ضریب m [25]

$$m_{CP} = \frac{\Delta_U}{\Delta_Y} \quad (1)$$

$$m_{LS} = 0.75 \times m_{CP} \quad (2)$$

$$m_{IO} = 0.67 \times m_{LS} \quad (3)$$

پس از دو خطی سازی نمودارها ضریب اصلاح شکل پذیری (ضریب m)، برای نمونه ها استخراج و مقادیر آن در جدول ۴ نشان داده شده است.

جدول ۴ ضرایب m محاسبه شده برای نمونه ها

نمونه	m_{CP}	m_{LS}	m_{IO}
SPSW	۳/۳۵	۲/۵۱	۱/۶۸
CSPSW	۲/۶۸	۲/۰۲	۱/۳۵
SPSW	۴/۴۵	۳/۸۳	۲/۲۳
CSPSW	۳/۶۴	۳/۴۳	۲/۲۵

نمونه	حداکثر برش پایه (KN)		
	تحلیلی	آزمایشگاهی	تفاوت (%)
SPSW	۸۱۴/۳۱	۹۰۰	-۱۰
CSPSW	۷۵۱/۵۳	۷۷۰	-۲

نمونه	مقاومت تسلیم (KN)		
	تحلیلی	آزمایشگاهی	تفاوت (%)
SPSW	۷۴۴/۶۱	۷۱۴/۷۵	+۴
CSPSW	۴۸۳/۲۵	۵۸۰/۶۰	-۲۰

شایان ذکر است مقادیر نشان داده شده در جدول ۲ برای مقاومت برشی حداکثر نمونه ها در حالت تحلیلی، مقاومتی است که در مدل المان محدود در جابه جایی متناظر با حداکثر مقاومت نمونه در آزمایشگاه به دست آمده است. از آنجا که در این پژوهش، خرابی اعضا در مدل سازی در نظر گرفته نشده است، رفتار اعضا در مدل تحلیلی پس از رسیدن به حداکثر ظرفیت پلاستیک در همان سطح باقی ماند و افت مقاومت در منحنی رفتار تحلیلی نمونه ها مشاهده نشد. نسبت شکل پذیری یکی دیگر از پارامترهایی است که به منظور بررسی خصوصیات لرزه ای و سازه ای یک سیستم، باید محاسبه شود. نتایج به دست آمده برای نمونه های آزمایشگاهی و تحلیلی در جدول ۳ ارائه شده است. یادآوری می شود که برای مدل سازی کلیه نمونه ها، معیار خرابی در نظر گرفته نشده است. بنابراین، محاسبه جابه جایی حداکثر برای کلیه نمونه ها براساس وقوع اولین خرابی در اجزای دیوار صورت گرفته است، به این صورت که در هر نمونه اجزای اصلی، مانند: تیر فوقانی، ستون ها و ورق جان از نمونه جدا شده و جابه جایی کل نمونه متناظر با وقوع اولین خرابی در عضو ثبت شده است.

جدول ۳ ضریب شکل پذیری نمونه های آزمایشگاهی با تحلیلی

نمونه	Δ_y (mm)	Δ_{max} (mm)	$\mu = \Delta_{max}/\Delta_y$
SPSW	۷/۱۵	۳۱/۹۰	۴/۴۶
CSPSW	۵/۱۷	۱۷/۶۳	۳/۴۱
SPSW	۸/۸۰	۶۵/۲۲	۷/۴۱
CSPSW	۳/۴۲	۳۰/۲۲	۶/۱۰

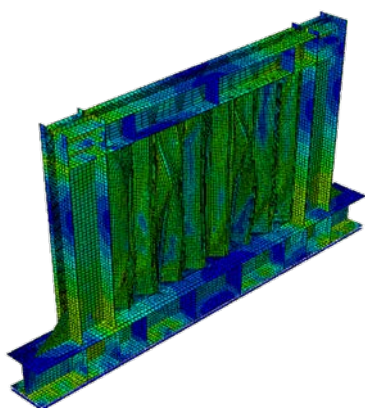
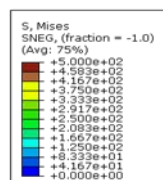
۷- ضریب اصلاح بر مبنای رفتار غیر خطی اعضا

در تحلیل خطی، مدل خطی الاستیک برای رفتار اعضا فرض شده است و تأثیر بارگذاری جانبی در این مدل بررسی می شود. در صورتی که مدل پاسخ غیر خطی از خود نشان دهد که البته در اغلب مواقع این اتفاق می افتد، بار جانبی و متعاقب آن نیروی داخلی اعضا از حد تسلیم فراتر می رود. اینکه تا چه حدی نیروهای داخلی ایجاد شده در اعضا فراتر از نیروهای متناظر با

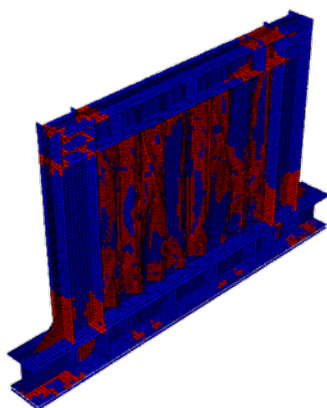
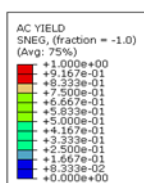
با مقایسه نتایج آزمایشگاهی و تحلیلی در دو نمونه SPSW و CSPSW ضریب m_{CP} به ترتیب حدود ۳۳٪ و ۳۵٪ کمتر و برای ضریب m_{LS} به ترتیب حدود ۵۲٪ و ۶۹٪ و ضریب m_{IO} به ترتیب حدود ۳۲٪ و ۶۶٪ کمتر است.

۸- بررسی تغییر شکل نمونه‌ها در تحلیل اجزای محدود

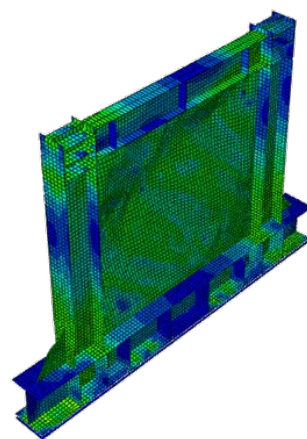
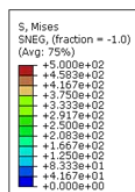
شکل ۱۵ تغییر شکل نمونه‌ها پس از اتمام تحلیل و آنالیز را نشان می‌دهد. در این تصاویر کنتورهای رنگی نمایشگر مقدار تنش فون میسر بر حسب مگاپاسکال است. علاوه بر نمایش توزیع تنش فون میسر برای هر نمونه، تصاویر مربوط به نواحی تسلیم شده در هر نمونه نیز ارایه شده است.



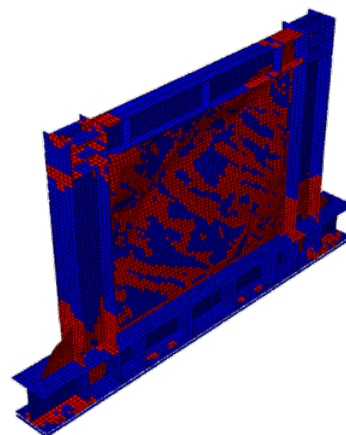
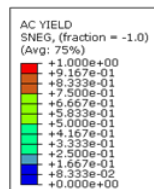
ب-۱



ب-۲



الف-۱



الف-۲

الف-۱ تغییر شکل و توزیع تنش فون میسر برای نمونه سخت نشده SPSW

الف-۲ نواحی تسلیم شده در نمونه SPSW

ب-۱ تغییر شکل و توزیع تنش فون میسر برای نمونه موجدار عمودی CSPSW

ب-۲ نواحی تسلیم شده در نمونه CSPSW

شکل ۱۵ تغییر شکل و توزیع تنش فون میسر، نواحی تسلیم شده در نمونه‌ها

تسلیم ورق جان کلیه نمونه‌ها، در همه سطح آن پخش شده است. مقاطع بحرانی و مفاصل پلاستیک در دو انتهای تیر فوقانی و در مجاورت اتصال آن با ستون، در پای ستون‌ها و در تیر تحتانی در زیر ناحیه اتصال ستون، مطابق با انتظار و تحلیل انجام شده اتفاق افتاد. در کلیه نمونه‌ها کماتش و تسلیم ورق جان دیوار برشی نیز به وضوح قابل مشاهده است.

۹- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

برای تحلیل اجزای محدود، ابتدا دو موضوع اثر مقدار تغییر شکل اولیه ورق جان و اندازه مش بر رفتار نمونه مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که مقدار تغییر شکل اولیه ورق جان تأثیر زیادی در رفتار نمونه‌ها ندارد، ولی با کوچکتر شدن اندازه مش‌ها دقت نتایج بالاتر خواهد رفت. با توجه به هزینه‌های مربوط به کوچک شدن اندازه مش و زمان بر بودن، دقت مش‌بندی طوری انتخاب شد که خطا در محاسبه برش پایه کمتر از ۵ درصد باشد.

[20] S. Tipping, B. Stojadinovic, *Innovative corrugated steel shear walls for multi-story residential buildings*, The 14th World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, China, 2008.

[۲۱] م. اخوان‌سیگاری، ع. جغتایی، ن. خواجه‌احمدعطاری، رساله دکتری، بررسی رفتار دیوارهای برشی فولادی تقویت‌شده با سخت‌کننده‌های قطری، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی شریف، ۱۳۹۵.

[۲۲] س. م. دشتی‌زند، و. ر. کلات‌جاری، ن. خواجه‌احمدعطاری، بررسی آزمایشگاهی سختی، مقاومت و برش پایه دیوارهای برشی فولادی صاف و موجدار دوزنقه‌ای قائم، نشریه علمی- پژوهشی سازه و فولاد، سال پانزدهم، شماره ۳۲، ۱۴۰۰.

[23] ATC-24, *Guidelines for cyclic testing of components of steel structures*, Applied Technology Council, Redwood City, CA, 1992.

[24] ASCE/ SEI, *Seismic Rehabilitation of Existing Buildings*, Reston, VA, American Society of Civil Engineers, 41-17, 2017.

[25] Gayed botros, Kulak GL, "Nonlinear Finite Element Analysis of corrugated steel plate shear walls", Journal of Structural Engineering, ASCE 1998, 124(2), 112-2, 2006.

بعد از صحت‌سنجی مدل‌های تحلیلی، با مقایسه نتایج تحلیلی و نتایج نمونه‌های آزمایشگاهی معتبر مدل‌سازی نمونه‌ها انجام شد.

با مقایسه نمونه تحلیلی نسبت به نمونه آزمایشگاهی برای نمونه‌های CSPSW و SPSW سختی اولیه ۳- و ۱۷+ درصد، سختی مؤثر به ترتیب ۱۷- و ۳۳+ درصد و حداکثر برش پایه به ترتیب ۱۰- و ۲- درصد و مقاومت تسلیم به ترتیب ۴+ و ۲۰- درصد مشاهده گردید.

از نتایج تحلیلی مشاهده شد که مدل‌سازی تحلیلی به خوبی قادر به پیش‌بینی نتایج است و انطباق خوبی بین نتایج وجود دارد.

۱۰- مراجع

[۱] الف. زمانی‌بیدختی، س. م. دشتی‌زند، "بررسی سیستم دیوار برشی پیش‌ساخته حفاظت شده با اتصال پیچی"، اولین کنفرانس بین‌المللی عمران، معماری و شهرسازی ایران معاصر، تهران، ۱۳۹۶.

[2] A. S. C. Engineers, *Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures*, ASCE Standard 7-10, American Society of Civil Engineers, 2010.

[3] ANSI, AISC 341-10, *Seismic Provisions for Structural Steel Buildings*, American Institute of Steel Construction, Chicago, 2010.

[4] AISC Steel Design Guide 20, *Steel Plate Shear Walls*, IL, American Institute of Steel Construction, Inc., Chicago, 2007.

[5] P. Timler, G. Kulak, *Experimental Study of Steel Plate Shear Walls*, Structural Engineering Report, No. 114, Alberta, Edmonton, 1983.

[6] M. Elgaaly, V. Caccese, C. Du, *Post-Buckling Behavior of Steel-Plate Shear Walls Under Cyclic Loads*, Journal of Structural Engineering, Vol. 119, No. 2, pp. 588-605, 1993.

[7] R. Driver, G. Kulak, D. Kennedy, A. Elwi, *Finite Element Modelling of Steel Plate Shear Walls*, Proceedings of the Structural Stability Research Council Annual Technical Session, pp. 253-264, 1997.

[8] M. Alinia, M. Dastfan, *Cyclic behaviour, deformability and rigidity of stiffened steel shear panels*, Journal of Constructional Steel Research, Vol. 63, pp. 554-563, 2007.

[9] S. Sabouri-Ghomi, R. Sajjadi, *Experimental and Theoretical Studies of Steel Shear Walls With and Without Stiffeners*, Journal of Construction Steel Research, Vol. 75, pp. 152-159, August, 2012.

[10] M. Alinia, R. Sarraf Shirazi, *On the design of stiffeners in steel plate shear walls*, Journal of Constructional Steel Research, Vol. 65, pp. 2069-2077, 2009.

[11] G. Grondin, Q. Chen, A. Elwi, J. Cheng, *Stiffened Steel Plates Under Compression and Bending*, Journal of Constructional Steel Research, Vol. 45, No. 2, pp. 125-148, 1998.

[12] M. Elgaaly, R. W. Hamilton, A. Seshadri, *Shear strength of beam with corrugated webs*, Journal of Structural Engineering, ASCE, 122, pp. 390-398, 1996.

[13] S. A. Ibrahim, W. W. El-Dakhkhni, M. Elgaaly, *Behavior of bridge girders with corrugated webs under monotonic and cyclic loading*, Engineering Structures, 28, pp. 1941-1955, 2006.

[14] E. Y. Sayed-Ahmed, *Behavior of steel and composite girders with corrugated steel webs*, Canadian Journal of Civil Engineering, 28, pp. 656-672, 2001.

[15] J. Yi, J. Gil, H. Youm, H. Lee, "Interactive shear buckling corrugated steel webs", Engineering Structures, 30, pp. 1659-1666, 2008.

[16] Gayed botros, Kulak GL, "Nonlinear Finite Element Analysis of corrugated steel plate shear walls", Journal of Structural Engineering, ASCE 1998, 124(2), 112-20, 2006.

[۱۷] ر. میرقادر، ش. ترابیانی، "رفتار و محدوده کاربرد دیوارهای برشی فولادی موجدار"، نشریه دانشکده فنی دانشگاه تهران، دوره ۴۰، شماره ۵، ۱۳۸۵.

[۱۸] ح. کلایی، ف. علایی، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، بررسی رفتار دیوار برشی فولادی با ورق موجدار دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود، ۱۳۹۲.

[۱۹] الف. کلاتری، و. ر. کلات‌جاری، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، بررسی عملکرد سیستم نوین دیوار برشی موجدار تقویت شده با ورق فولادی دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود، ۱۳۹۶.



فرکانس غالب ساختگاه بر اساس نسبت طیفی مؤلفه افقی به عمودی زمین‌لرزه‌های ایران با استفاده از شتاب‌نگارها

عطیه اسحاقی^{۱*}، محمد شاهوار^۲، اسماعیل فرزنانگان^۳، حسین عبداللهی^۴

۱. استادیار، زلزله‌شناسی مهندسی، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، تهران

۲. استادیار، زلزله‌شناسی مهندسی، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، تهران

۳. عضو هیأت علمی مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، تهران

۴. کارشناس، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، تهران

* تهران، بزرگراه شیخ فضل‌الله نوری، صندوق پستی ۱۶۹۶-۱۳۱۴۵، پست الکترونیکی: a.eshaghi@bhrc.ac.ir

چکیده

در این مطالعه، مقادیر نسبت طیفی مؤلفه افقی به عمودی (H/V) برای داده‌های جنبش نیرومند زمین ثبت شده توسط شبکه شتابنگاری زلزله ایران (ISMN) محاسبه شده است. سپس، یک رویه یکنواخت و مشخص برای انتخاب فرکانس بیشینه (f_{peak}) از نسبت طیفی H/V متوسط برای هر ایستگاه در پایگاه داده اعمال شده است. بر اساس این رویه، مقدار فرکانس بیشینه در ۴۶۷ ایستگاه شبکه شتابنگاری زلزله ایران برآورد شده است. همچنین، رابطه بین فرکانس بیشینه و مقدار سرعت موج برشی در ۳۰ متر اول (VS30) مورد بررسی قرار گرفته و در نهایت، این رابطه برای ایران ارائه شده است. نتایج و عدم قطعیت‌های مدل مربوط با سایر مطالعات مرتبط انجام شده برای ژاپن، آمریکای شمالی مرکزی و شرقی و همچنین، مطالعات قبلی برای ایران مقایسه شده است. در مقایسه با سایر مجموعه‌های داده، مدل VS30 ارائه شده برای ایران بالاترین مقادیر VS30 را در بین همه مدل‌ها نشان می‌دهد. از معادله توسعه‌یافته در این مطالعه می‌توان برای تخمین VS30 در ایستگاه‌های ISMN که هیچ مشخصه ساختگاه دیگری وجود ندارد استفاده نمود. همچنین، با استفاده از فرکانس بیشینه به‌دست آمده می‌توان نوع خاک را بر اساس استاندارد ۲۸۰۰ طبقه‌بندی نمود.

کلیدواژگان

اثرهای ساختگاه، شتابنگار، نسبت طیفی مؤلفه افقی به عمودی H/V، سرعت موج برشی در ۳۰ متر اول (VS30)

Fundamental Site Frequency Based on H/V Spectral Ratios of Iranian Earthquakes Using Strong Motion Data

Attieh Eshaghi^{1*}, Mohammad Shahvar², Esmail Farzanegan³, Hossein Abdollahi⁴

1, 2, 3. Faculty member, Road, Housing, and Urban Development Research Center, Tehran, Iran

4. M.Sc., Research expert, Road, Housing and Urban Development Research Center, Tehran, Iran

* P.O. Box 13145-1696, Tehran, Iran, a.eshaghi@bhrc.ac.ir

Abstract

In this study, horizontal-to-vertical (H/V) spectral ratio have been calculated for strong ground motion data recorded by the Iranian Strong Motion Network (ISMN). Then, a uniform and specific procedure is applied for selecting the peak frequency (f_{peak}) of the average H/V spectral ratio for each station in the database. Based on this procedure, the f_{peak} value is estimated at 467 stations of ISMN. Also, the relationship between peak frequency and time-averaged shear-wave velocity in the upper 30 m (VS30) has been investigated and this relationship is presented for Iran. The results and uncertainties of the model are compared with other related studies conducted in Japan, Central and Eastern North America (CENA), as well as previous studies for Iran. Compared to other datasets, the VS30 model presented for Iran shows the highest VS30 values among all models. The equation developed in this study can be used to estimate VS30 at ISMN stations where there is no other site characteristics. Also, using the peak frequency obtained, the soil type can be classified according to the 2800 standard.

Keywords

Site Effects, Strong Motion Data, Horizontal-to-Vertical (H/V) Spectral Ratio, Time-Averaged Shear-Wave Velocity in the Upper 30 m (VS30)

۱- مقدمه

میزان جنبش زمین، محتوای فرکانسی و مدت زمان زلزله تأثیر می‌گذارد
آبه عنوان مثال ۱ و ۲. در نتیجه تحقیقات علمی، تجربی و نظری متعددی
در مورد این پدیده صورت گرفته است. در میان روش‌های مختلفی که برای

شرایط زمین‌شناسی محلی یک ساختگاه یا به عبارتی، اثر پاسخ ساختگاه یکی
از عوامل کلیدی در تعیین میزان خسارت ناشی از زلزله است که بر روی

است (<https://ismn.bhrc.ac.ir>). در این مطالعه از داده‌های شتابنگاری ثبت شده از رویدادهایی با بزرگی (M) بزرگتر از ۲.۵ که در ایستگاه‌های دارای فاصله رومرکزی $R \leq 300$ کیلومتر ثبت شده‌اند استفاده شده است (جدول ۱).

جدول ۱ مشخصات داده‌های مورد استفاده در مطالعه

تعداد نگاشت سه مؤلفه‌ای	تاریخ	بزرگا	فاصله
6771	1999-2018	$M \geq 2.5$	$R < 300 \text{ km}$

در ابتدا، ۶۷۷۱ نگاشت سه مؤلفه‌ای ثبت شده در ۸۴۴ ایستگاه انتخاب گردید (جدول ۱). شکل ۱ نقشه ایستگاه‌های ثبت‌کننده و زمین‌لرزه‌های مورد استفاده در این مطالعه را نشان می‌دهد. تمام نگاشت‌های موجود در بانک به‌صورت چشمی بررسی شدند و شروع امواج P و S و همچنین پنجره S در آنها تعیین گردید. پس از آن، نگاشت‌های با کیفیت که دارای شروع موج P و S واضح بودند و همچنین پنجره S در آنها مشخص بود، برای وارد شدن به محاسبات انتخاب شدند. در این مطالعه زلزله‌هایی که حداقل سه نگاشت ثبت شده با کیفیت داشتند انتخاب شدند و برای محاسبه نهایی فرکانس بیشینه یا f_{peak} مورد استفاده قرار گرفتند.

به‌طور کلی، عملیات زیر بر روی تمام شتابنگاشت‌ها انجام پذیرفته است:

- ۱- نگاشت‌ها تصحیح خط مبنا شده‌اند.
- ۲- نسبت سیگنال به نویز (S/N) برای هر مؤلفه نگاشت محاسبه شده است و باند فرکانسی که در آن نسبت S/N بیشتر از سه است، برای وارد شدن در محاسبات انتخاب شده است.
- ۳- نگاشت‌ها بر اساس نسبت سیگنال به نوفه فیلتر شدند تا بازه فرکانسی که در آن نگاشت قابل اعتماد است مشخص شود و در محاسبات مورد استفاده قرار گیرد.
- ۴- پنجره انتخابی از شروع موج P تا انتهای S برای استفاده در محاسبات انتخاب شده است.
- ۵- طیف فوریه (FAS) برای سه مؤلفه نگاشت در باند فرکانسی از پیش تعیین‌شده (در ۱۰۰ بازه فرکانسی لگاریتمی نمونه‌گیری شده به طور مساوی در فاصله از ۰.۱ تا ۴۹ هرتز) محاسبه گردیده است.
- ۶- طیف فوریه (FAS) هر مؤلفه با استفاده از یک پنجره کانو-امچی^۳ [۱۲] با پارامتر پهنای باند، b، برابر با ۲۰ هموار شده است.
- ۷- مقدار H/V برای هر نگاشت سه مؤلفه‌ای محاسبه شده است (توضیحات در ادامه). داده‌ها فقط برای فرکانس‌هایی با نسبت سیگنال به نویز بیشتر از سه حفظ شده‌اند.

در نهایت، ۴۹۰۱ نگاشت سه مؤلفه‌ای وارد محاسبات نهایی شدند.

محاسبه اثر تقویت ساختگاه معرفی شده‌اند، یک روش بر اساس طیف مشاهده شده نسبت مؤلفه افقی به عمودی (H/V) داده‌های جنبش نیرومند زمین ارائه شده است. اعتقاد بر این است که نسبت H/V منعکس‌کننده اثرهای کل تقویت در یک ساختگاه است. مطالعات بسیاری نشان داده‌اند که نسبت H/V در خاک نرم، معمولاً بیشینه واضح و پایداری را نشان می‌دهد که با فرکانس تشدید (f_0) همبستگی دارد [۳]. در نتیجه از این روش می‌توان برای تخمین f_0 ، که پارامتر مهمی برای توصیف پاسخ محلی خاک است استفاده نمود [۱، ۴، ۵ و ۶]. این روش همچنین دارای مزیت ارائه اطلاعات برای ساختگاه‌های موردنظر بدون نیاز به عملیات اضافی و هزینه‌بر است. یکی دیگر از پارامترهای شاخص برای توصیف میزان سختی خاک در یک ساختگاه خاص در زلزله‌شناسی مهندسی، VS30 است که نشان‌دهنده سرعت موج برشی متوسط تا عمق ۳۰ متری است. این پارامتر به عنوان یک متغیر برای اثرهای ساختگاه در تعدادی از معادلات اخیر پیش‌بینی حرکت زمین^۱ (GMPE) استفاده شده است. آیین‌نامه ایمنی ساختمان‌ها در برابر زلزله یا استاندارد ۲۸۰۰ در ایران و همچنین، بسیاری دیگر از آیین‌نامه‌های طراحی لرزه‌ای مانند قانون ساختمان ایالات متحده (شورای ایمنی لرزه‌ای ساختمان ۲۰۰۹) و اروپا (Eurocode 8) برای در نظر گرفتن شرایط پاسخ ساختگاه در ارزیابی جنبش نیرومند زمین طرح به VS30 متکی هستند. هر چند مقدار قابل‌توجهی تغییرات جنبش زمین غیرقابل توضیح پس از حذف اثر ساختگاه، پیش‌بینی شده توسط VS30 باقی می‌ماند [۷ و ۸]. با این حال، چندین مطالعه نشان داده‌اند که ممکن است VS30 نتواند پیش‌بینی صحیحی از تقویت ساختگاه به خصوص در فرکانس‌های پایین ارائه دهد [۹ و ۱۰]. همچنین، این مقدار در همه ساختگاه‌ها ممکن است موجود نباشد. در این مطالعه، مقدار H/V با استفاده از شتابنگاشت‌های ثبت شده توسط ایستگاه‌های شبکه شتابنگاری زلزله ایران (ISMN) محاسبه گردیده است. سپس، مقدار فرکانس بیشینه در هر ایستگاه به‌دست آمده است. همچنین، همبستگی بین مقادیر اندازه‌گیری شده VS30 به‌دست آمده از روش ژئوفیزیکی شکست مرزی و فرکانس بیشینه برای ایستگاه‌های ثبت‌کننده زلزله مورد بررسی قرار گرفته است و یک مدل پیش‌بینی‌کننده VS30 با استفاده از پارامترهای H/V ارائه شده است.

۱-۱- داده شتابنگاری

شبکه شتابنگاری زلزله ایران (ISMN)^۲ در سال ۱۳۵۲ تأسیس گردیده است و به عنوان شبکه ملی شتابنگاری ایران شناخته می‌شود. این شبکه در حال حاضر دارای بیش از ۱۳۵۰ ایستگاه شتابنگاری فعال است و بیش از ۱۵۰۰۰ شتابنگاشت سه مؤلفه‌ای در بانک داده‌های آن وجود دارد. بیشتر این دستگاه‌های شتابنگاری در مناطق با لرزه‌خیزی بالا یا مراکز پرجمعیت و صنعتی قرار گرفته‌اند. نگاشت‌های حاصل نیز توسط چهار نسل مختلف از دستگاه‌های شتابنگاری ثبت و ضبط گردیده‌اند که سه نسل از آنها کماکان در این شبکه فعال هستند و جنبش نیرومند زمین را ثبت می‌نمایند [برای اطلاعات بیشتر مراجعه شود به ۱۱]. ایستگاه‌های ISMN در مناطق با شرایط مختلف زمین‌شناسی نصب گردیده‌اند، اما فقط چهار ایستگاه دارای گمانه هستند که به آرایه لازم برای مقایسه جنبش زمین ثبت شده در سطح با عمق مجهز هستند. در همین حال، VS30 برای ۵۵۰ ایستگاه تعیین شده است که اطلاعات مربوط به این ایستگاه‌ها در وبگاه شبکه شتابنگاری موجود

¹ Ground Motion Prediction Equations

² Iran Strong Motion Network (ISMN)

³ Konno-Ohmachi

پروکسی [۲۳ و ۲۴] برای اندازه‌گیری سرعت موج برشی، و در نتیجه محاسبه V_{S30} در دسترس است.

شایان ذکر است در این مطالعه، سرعت موج برشی تمام ایستگاه‌هایی که V_{S30} برای آنها گزارش شده است، با استفاده از روش ژئوفیزیکی شکست مرزی محاسبه شده‌اند و تنها چهار ایستگاه در تهران هستند که ایستگاه درون چاهی دارند و همچنین، سرعت موج برشی بر اساس لاگ‌گیری گمانه موجود است. به‌طور کلی، لرزه‌نگاری انعکاسی و شکست مرزی دو روشی هستند که در آنها ساختار سرعت لرزه‌ای زمین‌شناسی زیر سطحی با استفاده از اندازه‌گیری‌های سطحی برآورد می‌شود. برای بیش از ۵۵۰ ایستگاه شتابنگاری در ایران بر اساس روش شکست مرزی مقدار V_{S30} تعیین شده است و در بانک اطلاعاتی شبکه این اطلاعات موجود هستند [۲۵]. روش بسیار دقیق دیگر برای به‌دست آوردن سرعت موج برشی و به‌طور کلی، خصوصیات ساختگاه و الگوی پاسخ ساختگاه احداث و حفر گمانه و انجام دادن روش‌های ژئوفیزیکی و ژئوتکنیکی است. این روش دقیق اما بسیار پرهزینه است. در ایران در سال ۱۳۸۵ با توجه به اهمیت شهر تهران برای اولین بار احداث آرایه درون چاهی، در دو راستای شمالی- جنوبی و شرقی- غربی برای چهار ایستگاه انجام شده است.

۲- محاسبه نسبت طیفی H/V

۲-۱- روش محاسبه نسبت طیفی H/V

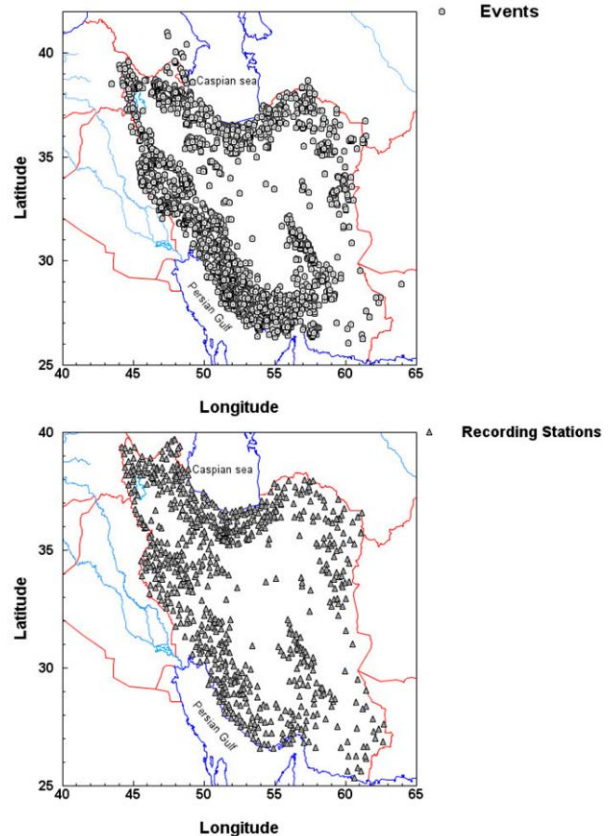
در ابتدا برای محاسبه H/V هر نگاشت سه مؤلفه‌ای، نخست طیف فوریه از هر مؤلفه شتاب را با استفاده از یک پنجره کانو- اوماچی [۱۲] با پارامتر هموارسازی $b=20$ نرم می‌کنیم [۲۶]. در این قسمت ما مقدار طیف را در ۱۰۰ نقطه بین فرکانس ۰.۱ تا ۴۹ هرتز محاسبه می‌نماییم. ما از طیف فوریه استفاده نمودیم به دلیل اینکه مطالعات گذشته نشان می‌دهد که این روش باعث به دست آمدن f_{peak} با دقت بالاتر می‌شود [۲۷]. پس از این مرحله، میانگین دو مؤلفه افقی را در مقیاس $\log_{10}$ محاسبه می‌کنیم؛ و پس از آن نسبت طیفی H/V با تقسیم میانگین هندسی طیف‌های افقی بر طیف دامنه هموار شده مؤلفه عمودی محاسبه می‌شود:

$$\log(H/V)_{ij} = 0.5(\log(H_1) + \log(H_2)) - \log(V), \quad (2)$$

که در آن، H_1 و H_2 طیف فوریه مؤلفه‌های افقی به ترتیب شرقی- غربی و شمالی- جنوبی هستند و V طیف فوریه مؤلفه عمودی مربوط است که در ایستگاه i از رویداد j ثبت شده‌اند. توجه داشته باشید که ما در سراسر این مطالعه از واحد لگاریتمی پایه ۱۰ استفاده می‌کنیم. سپس، طیف نهایی H/V در هر ایستگاه به عنوان میانگین مقادیر $\log(H/V)$ همه شتابنگاشت‌های ثبت شده در آن ایستگاه محاسبه می‌شود.

$$\log(\bar{H/V})_{i,f} = \frac{\sum_{j=1}^{N_{i,f}} \log(H/V)_{ij}}{N_{i,f}} \quad (3)$$

به صورتی که $N_{i,f}$ تعداد زمین‌لرزه‌های ثبت شده در ایستگاه i در فرکانس f است و $N_{i,f}$ از ۳ تا ۱۹۳ متغیر است. شایان ذکر است این اعداد نشانگر نگاشت‌های با کیفیتی هستند که وارد محاسبات شده‌اند. $\log(\bar{H/V})_{i,f}$ در باند فرکانسی قابل اعتماد ایستگاه i محاسبه می‌شود. باند فرکانسی



شکل ۱ توزیع جغرافیایی زمین‌لرزه‌ها (بالا) و ایستگاه‌های ثبت‌کننده (پایین) مورد استفاده در مطالعه

۲-۱- سرعت موج برشی در ۳۰ متر بالایی از سطح

یک پارامتر شاخص جایگزین دیگر ساختگاه برای توصیف سختی لایه‌های خاک در زلزله‌شناسی مهندسی V_{S30} است که بیانگر متوسط سرعت موج برشی تا عمق ۳۰ متر است [۱۳] و از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$V_{S30} = 30 / \sum_{i=1}^n \frac{d_i}{v_{s_i}} \quad (1)$$

که در آن، d_i و v_{s_i} به ترتیب ضخامت (به متر) و سرعت موج برشی لایه نام (متر/ثانیه) را نشان می‌دهند و n نیز تعداد کل لایه‌ها است. V_{S30} چندین کاربرد دارد که عمده آن، استفاده به عنوان یک شاخص طبقه‌بندی‌کننده ساده برای ساختگاه، از نظر پاسخ لرزه‌ای آن در کدهای ساختمانی است [از جمله: ۱۴، ۱۵ و ۱۶]. همچنین، این پارامتر به عنوان یک متغیر توضیحی برای اثر ساختگاه در تعدادی از معادلات اخیر پیش‌بینی جنبش زمین^۱ (GMPEs) مورد استفاده قرار گرفته است [از جمله: ۱۷ و ۱۸]. V_{S30} یک متغیر نسبتاً ساده است که با تقویت ساختگاه همبستگی خوبی نشان می‌دهد [به عنوان مثال: ۱۹]، هرچند مقدار قابل توجهی تغییرات جنبش زمین پس از حذف اثر ساختگاه پیش‌بینی شده توسط V_{S30} باقی می‌ماند که کماکان غیرقابل توضیح‌اند [به عنوان مثال: ۷، ۸ و ۲۰]. روش‌های مختلف ژئوفیزیکی در محل ساختگاه [۲۱ و ۲۲]، یا روش‌های مبتنی بر

¹ Ground Motion Prediction Equations (GMPEs)

نمایانگر حداکثر میزان بزرگنمایی یا Apeak است و فرکانس مربوط به آن نیز fpeak است. با در نظر گرفتن فرضیه گفته شده برای نقطه حداکثری در محاسبات ما تعداد ۲۹۳ ایستگاه از ۴۶۷ ایستگاه یک نقطه حداکثری قابل توجه نشان می‌دهند. ۱۲۰ ایستگاه دارای دو نقطه حداکثری هستند و ۱۶ ایستگاه دارای ۳ نقطه حداکثری است. ۳۵ ایستگاه هم هیچ نقطه حداکثری قابل توجهی نداشتند که این ایستگاه‌ها از ادامه محاسبات حذف گردیدند. برای ایستگاه‌هایی که بیش از یک نقطه حداکثری داشتند، مشابه مطالعات پیشین [۲۶ و ۲۸] بزرگترین مقدار مشاهده شده برای نقطه بیشینه برای محاسبه Apeak و fpeak انتخاب شدند. برای نمونه نسبت طیف‌های مربوط به نگاشت‌های ثبت شده از زمین‌لرزه‌ها برای دو ایستگاه سیاهو و ابارق به همراه طیف H/V میانگین نهایی و همچنین نقاط حداکثری (دایره توپر) تعیین شده در شکل ۳ نشان داده شده‌اند. هر دو ایستگاه یک نقطه بیشینه واضح نشان می‌دهند. همچنین، ایستگاه ابارق که دارای سرعت موج برشی بالاتر است fpeak بالاتری نسبت به ایستگاه سیاهو نشان می‌دهد.

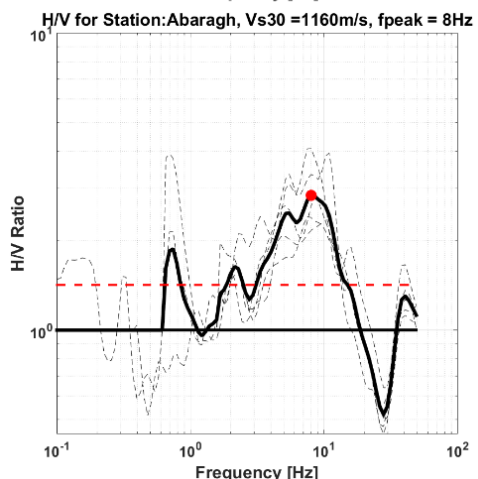
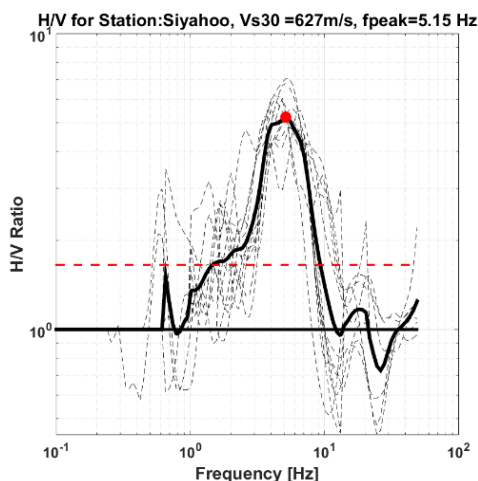
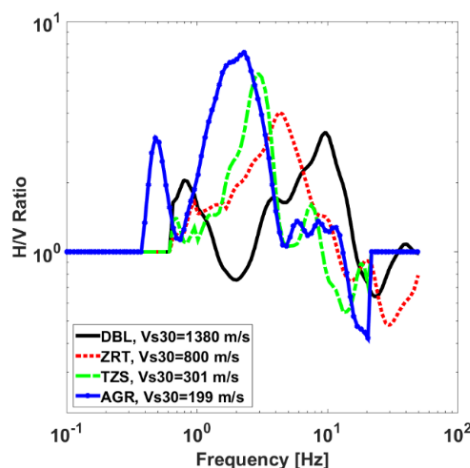


Figure 3: H/V Ratio vs Frequency [Hz] for Station: Siyahoo. The plot shows multiple H/V curves with a significant peak marked by a red dot at approximately 5.15 Hz. The y-axis is logarithmic from 10⁰ to 10¹, and the x-axis is logarithmic from 10⁻¹ to 10² Hz.

شکل ۳ نسبت طیفی H/V برای دو ایستگاه نمونه سیاهو و ابارق. خط‌چین‌های خاکستری نشان داده شده طیف‌های افقی به عمودی (H/V) از رویدادهای ثبت شده در هر ایستگاه هستند. خط توپر سیاه میانگین طیف (H/V)_f را نشان می‌دهد. دایره توپر قرمز Apeak نهایی انتخاب شده هستند.

قابل اعتماد هر ایستگاه به این صورت تعریف می‌شود که در توالی فرکانس‌های مربوط، حداقل داده از سه نگاشت وجود داشته باشد. به این صورت اطمینان بیشتری برای محاسبه میانگین وجود خواهد داشت [۲۸]. شکل ۲ نمونه‌های طیف به دست آمده H/V برای چهار ایستگاه مختلف را نشان می‌دهد که دارای سرعت موج برشی گزارش شده بودند.



شکل ۲ نمونه‌ای از طیف‌های به دست آمده برای H/V برای چهار ایستگاه مختلف که سرعت موج برشی گزارش شده داشتند. با کاهش سرعت میزان تقویت دامنه افزایش می‌یابد و مقدار فرکانس غالب به فرکانس‌های کوچکتر شیفت پیدا می‌کند.

همان‌گونه که انتظار می‌رود با کاهش سرعت، هم میزان تقویت دامنه افزایش می‌یابد و هم مقدار فرکانس غالب به فرکانس‌های کوچکتر شیفت پیدا می‌کند و این روند در شکل ۲ کاملاً مشهود است.

۲-۲- محاسبه مقادیر fpeak و Apeak در هر ایستگاه

در هر ایستگاه مقدار بیشینه H/V مشاهده شده به نام دامنه بیشینه^۱ خوانده می‌شود و فرکانسی که در آن مقدار این دامنه بیشینه به دست آمده است نیز فرکانس بیشینه^۲ نامیده می‌شود. روشی که ما برای تعیین این مقادیر بیشینه استفاده می‌کنیم یک روش قابل تولید مجدد است که در ادامه شرح داده شده است. همان‌گونه که در بخش داده‌های شتابنگاری شرح داده شد، ابتدا شتابنگاشت‌ها پردازش شده و پس از آن برای هر ایستگاه تمام نگاشت‌های ثبت‌شده با کیفیت وارد محاسبه نسبت H/V نهایی برای آن ایستگاه می‌شوند. برای اطمینان از مقادیر فرکانس بیشینه به دست آمده ایستگاه‌هایی که حداقل سه زمین‌لرزه ثبت شده با کیفیت داشتند انتخاب شدند. به این صورت ۴۶۷ ایستگاه بودند که بیش از سه نگاشت با کیفیت داشتند که تقریباً ۵۵٪ کل ایستگاه‌های مورد بررسی هستند. از میان نگاشت‌های مربوط به این ۴۶۷ ایستگاه ۴۹۰۱ نگاشت دارای کیفیت مناسب بودند و وارد محاسبات نهایی شدند. از بین ۴۶۷ ایستگاه ذکر شده، ۲۹۲ ایستگاه دارای VS30 گزارش شده هستند (۶۲٪ کل ایستگاه‌های مورد مطالعه). در این مطالعه یک نقطه حداکثری به صورت حداکثر محلی که دامنه آن بیش از بیشینه دو مقدار تعریفی ذیل باشد تعریف شده است: ۱- یک و نیم برابر میانگین H/V و ۲- مقدار ۰.۳ (که برابر با بزرگنمایی ۲ در حالت خطی است). این نقطه

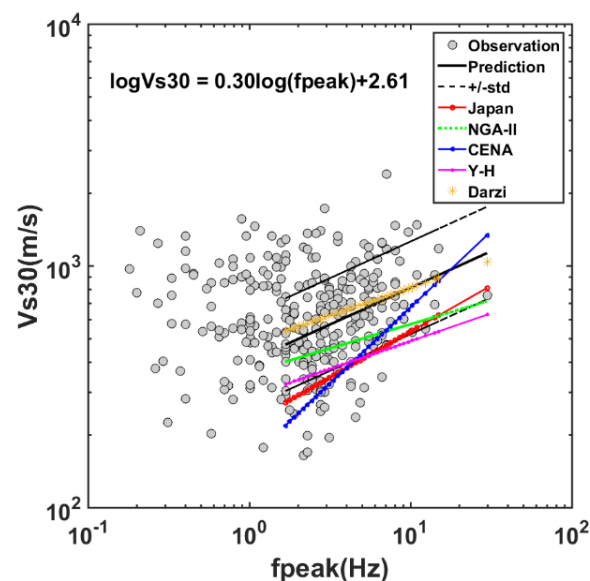
¹ Apeak

² fpeak

۳- نتایج

همان گونه که توضیح داده شد، مقادیر f_{peak} برای ۴۶۷ ایستگاه شتابنگاری که دارای حداقل سه نگاشت زمین لرزه ثبت شده با کیفیت بودند محاسبه گردید. ۲۹۲ ایستگاه از کل ایستگاه‌های مورد مطالعه دارای مقدار VS30 گزارش شده (به دست آمده از روش ژئوفیزیکی شکست مرزی) بودند. اطلاعات مربوط به این ایستگاه‌ها به همراه مقادیر به دست آمده برای f_{peak} در انتشارات مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی در دست چاپ است که علاءمندان در صورت تمایل می‌توانند به آن مراجعه فرمایند [۳۳]. با استفاده از این مقادیر رابطه بین سرعت موج و فرکانس بیشینه به دست آمده برای هر ایستگاه مورد مطالعه قرار گرفت تا مشخص شود که آیا می‌توان از مقدار f_{peak} به دست آمده برای تخمین VS30 در ایستگاه‌های لرزه‌نگاری استفاده نمود یا خیر. شکل ۴ توزیع مقادیر VS30 مشاهده شده را بر حسب مقدار f_{peak} نمایش می‌دهد. در این شکل، یک رابطه افزایشی خطی بین VS30 و f_{peak} برای $f_{peak} \geq 1.6$ هرتز وجود دارد که با معادله ۴ نشان داده شده است. در کل ۲۰۰ ایستگاه دارای مقدار f_{peak} بیش از ۱.۶ هرتز بودند. مقدار VS30 برای مقادیر $f_{peak} < 1.6$ با این معادله قابل برآورد نیست. مقدار انحراف معیار رابطه ۴ برابر با ۰.۱۹ در پایه لگاریتمی است که با ضریب عدم اطمینان ۱.۵۷ برابر است.

برای مقایسه، روابط به دست آمده برای ژاپن، NGA-II، آمریکای شمالی مرکزی و شرقی (CENA) و ایران [۲۶، ۲۸، ۲۹، ۳۰] در شکل ۴ نمایش داده شده‌اند و همچنین، به ترتیب در معادلات ۵ تا ۹ ارائه شده‌اند.



شکل ۴ VS30 به عنوان تابعی از f_{peak} . خط توپر مشکی بهترین خط برازش شده است (مدل مرتبه اول)، و خطوط خط‌چین مشکی مقادیر ± 1 انحراف معیار را نشان می‌دهند. روابط موجود برای ژاپن، NGA-II و CENA [۲۶ و ۲۸] و ایران [۲۹ و ۳۰] به ترتیب با خطوط قرمز، سبز، آبی، صورتی و نارنجی نشان داده شده‌اند.

(۴) این

$$\log(Vs30) = 0.30(\pm 0.11) * \log(f_{peak}) + 2.61(\pm 0.07) \pm 0.19,$$

مطالعه،
برای $f_{peak} \geq 1.6$ Hz

(۵) ژاپن

$$\log(Vs30) = 0.38(\pm 0.02) * \log(f_{peak}) + 2.35(\pm 0.01) \pm 0.16,$$

برای $f_{peak} \geq 1$ Hz

(۶) NGA-II

$$\log(Vs30) = 0.20(\pm 0.02) * \log(f_{peak}) + 2.56(\pm 0.01) \pm 0.15,$$

برای $f_{peak} \geq 1$ Hz

(۷) CENA

$$\log(Vs30) = 0.63(\pm 0.06) * \log(f_{peak}) + 2.2(\pm 0.04) \pm 0.14,$$

برای $f_{peak} \geq 2$ Hz

(۸) ایران

$$\log(Vs30) = 0.23(\pm 0.03) * \log(f_{peak}) + 2.46(\pm 0.018) \pm 0.14,$$

برای $f_{peak} \geq 1$ Hz , [۲۹]

$$\log(Vs30) = \log(290), \text{ برای } f_{peak} < 1 \text{ Hz}$$

(۹) ایران

$$\log(Vs30) = 0.23(\pm 0.1) * \log(f_{peak}) + 2.68(\pm 0.06) \pm 0.16,$$

برای $f_{peak} \geq 1$ Hz [۳۰]

نکته قابل توجه این است که رابطه به دست آمده در مطالعه حاضر با کمی اختلاف در شیب با رابطه درزی و همکاران [۳۰] همخوانی بهتری دارد. رابطه یغمایی و حسنی [۲۹] دارای یک خطای محاسبه است، از این جهت که در بانک داده ایستگاه‌های شبکه شتابنگاری زلزله ایران، تعداد زیادی ایستگاه با سرعت موج برشی زیر ۱۷۵ m/s وجود ندارد. احتمالاً سرعت در هدر داده‌ها اشتباه خوانده شده‌اند و برای همین مقدار عرض از مبدأ برای رابطه ۸ بسیار کمتر از رابطه به دست آمده در این مطالعه و مطالعه درزی و همکاران [۳۰] است. نکته دیگر این که در دو مطالعه دیگر در مورد ایران تعداد ایستگاه‌های به کار رفته برای تعیین f_{peak} ، کمتر از مقداری است که ما انتخاب کردیم (حداقل سه نگاشت با کیفیت در یک ایستگاه) که می‌تواند در تعیین فرکانس تشدید مطمئن بسیار تأثیرگذار باشد. همچنین، در مطالعه درزی و همکاران [۳۰] پراکندگی داده‌های با فرکانس بیشینه زیر یک هرتز نشان داده نشده‌اند تا بتوان انتخاب فرکانس یک هرتز را برای حد قابل قبول بودن فرکانس بررسی کرد.

نگاهی دقیق‌تر به شکل ۴ نشان می‌دهد که روندهای متفاوتی برای نواحی مختلف قابل مشاهده است. این موضوع نشان می‌دهد که رابطه بین VS30 و H/V با توجه به منطقه مورد مطالعه می‌تواند متفاوت باشد که بستگی به شرایط غالب خاک منطقه دارد. قابل توجه است که در بین مدل‌های مقایسه شده ساختگاه‌های ایران دارای بیشترین مقادیر VS30 هستند. همچنین مدل پیش‌بینی VS30 ایران f_{peak} کمتری را برای VS30 مشخص نشان می‌دهد، که این نکته را درزی و همکاران [۳۰] نیز در مطالعه خود ذکر نموده‌اند. یک دلیل مطرح شده برای این موضوع ممکن است وجود لایه‌های خاک کم سرعت در سطح برای اکثر ایستگاه‌های ایران باشد که خاک سخت‌تر را پوشانده‌اند [۳۰].

۴- نتیجه گیری

با استفاده از روش H/V مطالعاتی در مورد ایران انجام گرفته است که طبقه بندی نوع خاک را بر اساس استاندارد ۲۸۰۰ می توان با استفاده از مقدار فرکانس بیشینه تخمین زد [۳۱ و ۳۲]. با استفاده از نتایج به دست آمده از مطالعه حاضر می توان با استفاده از مقادیر fpeak به دست آمده طبقه بندی نوع خاک را در ایستگاه های شتابنگاری که دارای اطلاعات زمین شناسی VS30 نیستند، تخمین زد. همچنین، با استفاده از رابطه ۴ می توان مقدار VS30 را نیز در ایستگاه های فاقد مقدار گزارش شده تخمین زد.

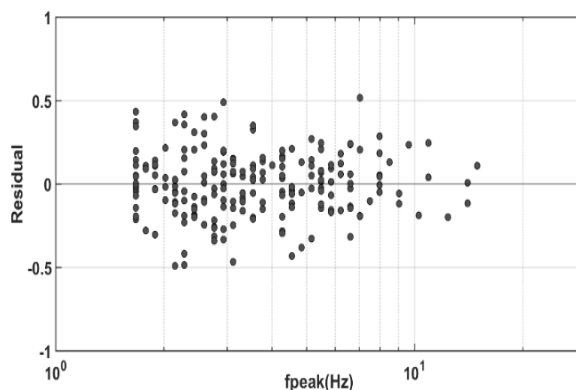
در مقایسه برتری های نسبی دو روش H/V و VS30 به عنوان متغیرهای توصیف کننده ساختگاه، به طور کلی می توان گفت که روش H/V ارزان تر است و به دست آوردن آن برای یک ساختگاه خاص آسان تر است، مگر اینکه VS30 از دیگر مؤلفه های برآورد کننده برای تعیین سرعت موج برشی (پروکسی هایی) مانند توپوگرافی تخمین زده شود که در این صورت عدم اطمینان بیشتری دارد. علاوه بر این، نسبت H/V حامل اطلاعات در مورد پاسخ لایه های عمیق تر است، در مقایسه با VS30 که فقط ۳۰ متر بالا را در نظر می گیرد. در نهایت، می توان گفت که روش H/V دارای اطلاعات غنی تری در مورد محتوای فرکانس و درجه تقویت است، در حالی که VS30 یک پارامتر توصیف کننده محدودتری است [۲۶]. در این مطالعه، سعی بر این شد که فرکانس بیشینه ساختگاه با استفاده از روش H/V تعیین گردد و همچنین رابطه بین VS30 و این پارامتر بررسی شد. چنین همبستگی برای درک بهتر نقاط قوت و ضعف این متغیرهای توصیف کننده ساختگاه مفید است. این رابطه به ما توانایی تخمین VS30 از نسبت H/V را می دهد که می توان از VS30 به دست آمده در کدهای ساختمانی و یا در روابط تخمین جنبش زمین استفاده کرد. به طور کلی، ساختگاه های نرم تر نسبت های بالاتر H/V را نسبت به ساختگاه های سخت تر نشان می دهند، و با افزایش نرمی (به عنوان مثال، از سنگ به خاک) فرکانس اوج به سمت مقادیر پایین تغییر می کند. به طور کلی، روش تجربی با استفاده از نسبت طیفی H/V در صورت وجود تعداد قابل توجهی نگاشت جنبش زمین، تقریباً روشی قابل قبول برای طبقه بندی نوع خاک ساختگاه ثبت کننده جنبش زمین است. ولی این نکته را باید مد نظر قرار داد که این روش به داشتن تعداد قابل توجهی نگاشت حاصل از جنبش زمین نیاز دارد و مقدار نهایی بزرگنمایی و فرکانس غالب به نگاشته های موجود وابسته است. در نهایت، باید این نکته را بیان داشت که اطلاعات حاصل از گمانه دارای دقت و اطمینان بالاتری هستند و در صورت موجود بودن این اطلاعات، می توان با ضریب اطمینان بالاتری اثر ساختگاه را مورد بررسی قرار داد. اما در صورتی که این اطلاعات موجود نباشند، روش های تجربی از جمله روش H/V به خاطر کم هزینه بودن و سرعت انجام دادن کار (در صورت موجود بودن شتابنگاشت های کافی و با کیفیت) جزو روش های پیشنهادی برای بررسی اثر ساختگاه هستند. با این حال، اندازه گیری موج برشی و اطلاعات بیشتر، مانند زمین شناسی سطحی، داده های گمانه و غیره هنوز برای روشن شدن عدم قطعیت چنین طرح های تجربی مورد نیاز است.

۵- قدردانی

از مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی جهت حمایت از پروژه "ارزیابی شرایط ساختگاه بر اساس نسبت طیفی مؤلفه افقی به عمودی زمین لرزه های ایران با استفاده از شتابنگارها" قدردانی می شود. همچنین، از سازمان برنامه و بودجه و وزارت راه و شهرسازی برای پشتیبانی و حمایت از شبکه شتابنگاری زلزله ایران قدردانی می گردد.

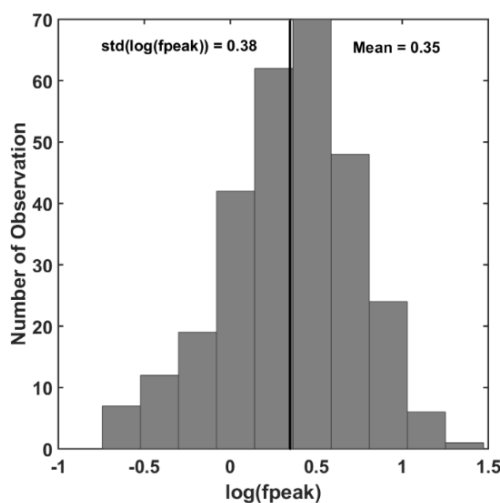
شکل ۵ مقادیر باقی مانده VS30 را با استفاده از رابطه ۴ پیشنهاد شده در این مطالعه نشان می دهد. مقادیر باقی مانده از رابطه زیر محاسبه شده اند:

$$\text{VS30} = \log_{10}(\text{VS30 مشاهده شده}) - \log_{10}(\text{پیش بینی شده VS30})$$



شکل ۵ توزیع مقادیر باقی مانده پیش بینی VS30 به عنوان تابعی از fpeak بر اساس مدل پیشنهادی در این مطالعه

همان گونه که از توزیع مقادیر باقی مانده در شکل ۵ مشخص است این مقادیر به صورت تصادفی توزیع شده اند و روند خاصی را نشان نمی دهند. توزیع فرکانس اوج به همراه مقدار میانگین و مقدار انحراف معیار آن در شکل ۶ ارائه شده است. مطابق شکل ۶، توزیع فرکانس اوج دارای چولگی منفی است. در این شکل می توان مشاهده کرد که بیشتر ایستگاه ها دارای fpeak در فرکانس های بالا هستند، که می توان دلیل آن را مربوط به لایه های خاک پوشاننده کم عمق با سرعت کمتر بر روی یک لایه سخت تر دانست. شایان ذکر است که نتایج به دست آمده در مطالعه درزی و همکاران [۳۰] نیز مقادیر مشابهی را برای مقدار میانگین فرکانس اوج (۰.۳۴) نسبت به مقادیر به دست آمده در این مطالعه یعنی ۰.۳۵ نشان می دهد.



شکل ۶ هیستوگرام فرکانس اوج به دست آمده از نسبت H/V با استفاده از داده های شتابنگاری مورد مطالعه

۶- مراجع

- [21] J. A. Hunter, H. L. Crow, Shear wave velocity measurement guidelines for Canadian seismic site characterization in soil and rock, (Open File 7078), *Geological Survey Canada*, 227, 2012, <http://dx.doi.org/10.4095/291753>.
- [22] S. L. Kramer, *Geotechnical earthquake engineering*, Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, p. 653.
- [23] T. Allen, D. J. Wald, On the use of high-resolution topographic data as a proxy for seismic site conditions (VS30), *Bulletin of the Seismological Society of America*, 99:935–43, 2009.
- [24] A. Yong, S. E. Hough, J. Iwahashi, A. Braverman, Terrain-based site conditions map of California with implications for the contiguous United States, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 102:114–28, 2012.
- [25] A. Farzanegan, H. Mirzaei Alavijeh, F. Sinaian, *Research report of construction geological studies using boundary failure seismography method in accelerometer stations of the country*, Publications of Building and Housing Research Center, 2010- 2011.
- [26] H. Ghofrani, G. Atkinson, Site condition evaluation using horizontal-to-vertical response spectralratios of earthquakes in the NGA-West 2 and Japanese databases, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 67, 30–43, 2014.
- [27] C. Zhu, F. Cotton, M. Pilz, Detecting Site Resonant Frequency Using HVSR: Fourier versus Response Spectrum and the First versus the Highest Peak Frequency, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 110(2):427–40, 2020, <https://doi.org/10.1785/0120190186>.
- [28] B. Hassani, G. Atkinson, Applicability of the Site Fundamental Frequency as a VS30 Proxy for Central and Eastern North America, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 106, 653–664, 2016.
- [29] S. Yaghmaei-Sabegh, B. Hassani, Investigation of the relation between Vs30 and site characteristics of Iran based on horizontal-to-vertical spectral ratios, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 128- 105899, 2020.
- [30] A. Darzi, M. Pilz, M. R. Zolfaghari, H. D. Fa, An Automatic Procedure to Determine the Fundamental Site Resonance: Application to the Iranian Strong Motion Network, *Pure and Applied Geophysics*, 176, 3509–3531, 2019, <https://doi.org/10.1007/s00024-019-02153-z>.
- [31] M. Zare, P. Y. Bard, M. Ghafory-Ashtiani, Site characterizations for the Iranian strong motion network, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 18:101–23, 1999.
- [32] F. Sinaiean, *Study on Iran strong motion records*, Ph.D. thesis, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology, Tehran, Iran, 2006.
- [۳۳] ع. اسحاقی، م. پورمحمدشاهوار، ا. فرزنانگان، ح. میرزایی، ارزیابی شرایط ساختگاه بر اساس نسبت طیفی مؤلفه افقی به عمودی زمین‌لرزه‌های ایران با استفاده از شتابنگارها، انتشارات مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، ۱۴۰۱.
- [1] P. Y. Bard, M. Bouchon, The two-dimensional resonance of sediment filled valley, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 75, 519–541, 1985.
- [2] J. Bielak, J. Xu, O. Ghattas, Earthquake ground motion and structural response in alluvial valleys, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 125, 413–423, 1999.
- [3] H. Cadet, P. Y. Bard, A. M. Duval, E. Bertrand, Site effect assessment using KiK-net data, Part 2: site amplification prediction equation based on f0 and Vs, *Bulletin of Earthquake Engineering*, 10:451–89, 2012.
- [4] G. M. Atkinson, J. F. Cassidy, Integrated use of seismograph and strong-motion data to determine soil amplification: Response of the Fraser River delta to the Duvall and Georgia Strait earthquakes, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 90:1028–40, 2000.
- [5] J. Lermo, F. J. Chávez-García, Site effects evaluation using spectral ratios with only one station, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 83:1574–94, 1993.
- [6] J. Lermo, F. J. Chávez-García, Are microtremors useful in site response evaluation?, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 84:1350–64, 1994.
- [7] D. M. Boore, Can site response be predicted?, *Journal of Earthquake Engineering*, 8:1–41, 2004.
- [8] V. W. Lee, M. D. Trifunac, Should average shear-wave velocity in the top 30 m of soil be used to describe seismic amplification?, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 30:1250–8, 2010.
- [9] D. Bindi, M. Massa, M. L. Luzi, G. Ameri, F. Pacor, R. Puglia, et al., Pan-European ground-motion prediction equations for the average horizontal component of PGA, PGV, and 5%- damped PSA at spectral periods up to 3 s using the RESORCE dataset, *Bulletin of Earthquake Engineering*, 12(1), 391–430, 2014.
- [10] M. Mucciarelli, M. R. Gallipoli, Comparison between Vs30 and other estimates of site amplification in Italy, *Proceedings of 1st European conference on earthquake engineering and seismology*, Cd-Rom edition, p. 270, 2006.
- [11] M. Shahvar, E. Farzanegan, A. Eshaghi, H. Mirzaei, *i1-net: The Iran Strong Motion Network*, *Seismological Research Letters*, 2021, doi: <https://doi.org/10.1785/0220200417>.
- [12] K. Konno, T. Ohmachi, Ground motion characteristics estimated from spectral ratio between horizontal and vertical components of microtremor, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 88:228–41, 1998.
- [13] R. D. Borcherdt, *Simplified site classes and empirical amplification factors for site dependent code provisions*, Proceedings of NCEER, SEAOC, BSSC workshop on site response during earthquakes and seismic code provisions, University of Southern California, Los Angeles, CA, Nov 18–20, 1992.
- [14] BSSC (Building Seismic Safety Council), *Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings and Other Structures, Parts: Provisions*, (Report No. FEMA-450), Washington D.C., Federal Emergency Management Agency, 2003.
- [15] CEN (European Committee for Standardization), *Eurocode 8: design of structures for earthquake resistance, part 1: general rules, seismic actions and rules for buildings*, Bruxelles, 2004.
- [16] NEHRP (National Earthquake Hazards Reduction Program), *Recommended provisions for seismic regulations for new buildings and other structures, Part 1, Provisions*, FEMA 368, Washington, D.C., Federal Emergency Management Agency, 2000.
- [17] N. Gregor, N. A. Abrahamson, G. M. Atkinson, D. M. Boore, Y. Bozorgnia, K. W. Campbell, et al., *Comparison of NGA-West 2 GMPEs, Earthq Spectra* 2014, <http://dx.doi.org/10.1193/070113EQS186M>.
- [18] S. Akkar, M. A. Sandikkaya, J. Bommer, Empirical ground-motion models for point- and extended- source crustal earthquake scenarios in Europe and the Middle East, *Bulletin of Earthquake Engineering*, 12:359–87, 2013.
- [19] D. M. Boore, W. B. Joyner, T. E. Fumal, *Estimation of response spectra and peak accelerations from western North American earthquakes, an interim report, Part 2*, U.S. Geological Survey Open-File Report, 93–509, 1994.
- [20] V. W. Lee, M. D. Trifunac, Should average shear-wave velocity in the top 30 m of soil be used to describe seismic amplification?, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 30:1250–8, 2010.



بررسی و شناخت اجرای نمای خشک و تأثیر آن روی ساختمان‌های بلند مرتبه

سعید بهرامی^{۱*}، مهناز رضایی^۲، رضا محبی^۳

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد معماری، دانشگاه غیاث‌الدین جمشید کاشانی، آبیک، قزوین، ایران

۲. استادیار، گروه معماری، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران

۳. استادیار، گروه معماری و شهرسازی، دانشکده عمران و مکانیک، دانشگاه غیاث‌الدین جمشید کاشانی، آبیک، قزوین، ایران

* کرج، ایران، صندوق پستی ۳۱۴۷۸۷۴۸۱۸، saeid.bahrami.one@gmail.com

چکیده

در طراحی و ساخت یک ساختمان، بحث نما بسیار پراهمیت است. در حقیقت طراحی و انتخاب نما یکی از مهم‌ترین بخش‌های ساختمان‌سازی است. موارد بسیار زیادی را در طراحی و انتخاب یک نمای اصولی باید در نظر داشت، از جمله: زیبایی نما، مصالح مورد نیاز برای اجرا، هزینه‌های پروژه، دوام و پایداری نما، و نحوه و زمان اجرا. با پیشرفت فناوری و مدرن شدن معماری، صنعت دکوراسیون و ساختمان، نمای ساختمان و روش‌های اجرای آن هم دستخوش تغییراتی شده‌اند. از این تغییرها می‌توان به رایج شدن روش‌های اجرای نمای خشک اشاره کرد. و اینکه آیا این نما با توجه به مؤلفه‌هایی که دارد، می‌تواند مثل نمای تر (سنتی) مورد توجه قرار گیرد؟ چرا هنوز این نما جایگاه خود را پیدا نکرده است؟ در این مقاله به شناسایی عوامل مؤثر در اجرای نماهای خشک پرداخته شده است و با استفاده از روش تصمیم‌گیری سلسله مراتبی به اولویت‌بندی عوامل شناسایی شده پرداخته شد و گزینه مناسب نمای مشهود و نامشهود انتخاب گردید. بررسی نتایج به دست آمده حاصل از نظرسنجی با ۲۰ نفر از کارشناسان خبره در زمینه اجرای نمای خشک نشان داد که زیرمعیار وابستگی به وجود افراد با مهارت و با تجربه در جایگاه اول قرار دارد. در ادامه می‌توان به زیرمعیار حفظ انرژی داخلی ساختمان در جایگاه دوم، سپس زیرمعیار مدت زمان اجرا و دسترسی به مصالح تشکیل‌دهنده نما در جایگاه سوم اشاره نمود. زیرمعیار دسترسی به دانش فنی از کمترین اهمیت برخوردار است و در روش تاپسیس و در نمای دو پوسته نسبت به سایر نماهای خشک اولویت دارد.

کلیدواژگان

ارتقای غنای بصری، نمای خشک، منظر شهری، ساختمان بلند مرتبه، نمای دو پوسته

Investigating and Recognizing the Implementation of Dry Facade and Its Impact on High-Rise Buildings

Saeed Bahrami^{1*}, Mahnaz Rezaei², Reza Mohebbi³

1. Master student, Ghiasuddin Jamshid Kashani University, Abyek, Qazvin, Iran

2. Assistant Professor, Department of Architecture, Islamic Azad University, Science and Research Branch, Tehran, Iran

3. Assistant Professor, Department of Architecture and Urban Planning, Faculty of Civil Engineering and Mechanics, Ghiasuddin Jamshid Kashani University, Abyek, Qazvin, Iran

* P.O. Box 31478748180 Karaj, Iran, saeid.bahrami.one@gmail.com

Abstract

In the design and construction of a building, the facade discussion is very important. In fact, facade design and selection is one of the most important parts of construction. There are many things to consider in designing and choosing a principled facade, including the beauty of the facade, the materials needed to execute the facade, the project costs, the durability and the stability of the facade, as well as the manner and time of execution. With the progress of technology and the modernization of architecture, the decoration and building industry, the facade of the building and the methods of its implementation have also undergone changes. Among these changes, we can mention the common methods of executing dry facades. And whether this facade can be considered as a wet (traditional) facade due to its components? And why is this facade still standing? Has not found himself? In this article, the effective factors in the implementation of dry views have been identified and using the hierarchical decision-making method, the identified factors have been prioritized and the appropriate option of visible and invisible view has been selected. The results of a survey with 20 experts in the field of dry facade showed that the sub-criterion of dependence on the presence of skilled and experienced people is in the first place, then the sub-criterion of maintaining the internal energy of the building in the second place then the sub-criterion for the duration of the access to the materials that make up the facade was mentioned in the third place. The sub-criterion of access to technical knowledge is of the least importance and is superior to other dry views in the TOPSIS method and in the two-shell view.

Keywords

Enhance Visual Richness, Dry Facade, Urban Landscape, High-Rise Building, Double-Skin Facade

۱- مقدمه

یک بعد مهم شهر، منظر است که در همه سطوح کلان تا خرد شهر حضور دارد. منظر بازتاب بیرونی همه آن چیزی است که درون شهر اتفاق می‌افتد. منظر یک شهر گویای بسیاری از ویژگی‌های درونی جامعه است. همچنین، منظر گویای آمال و آرزوها، ضعف‌ها و قوت‌ها، اولویت‌ها و روایتگر داستان زندگی مردم آن و به‌طور کلی، آئینه شهر در طول تاریخ است [1]. یکی از عناصر مهم منظر شهری، بدنه‌های شهری است. بدنه‌های شهری از مؤثرترین عناصر تأثیرگذار در کیفیت فضاهای شهری محسوب می‌گردند و اصلاح آنها می‌تواند به بالا رفتن کیفیت منظر عینی شهر منجر شود [2]. سطوح تشکیل‌دهنده هر بدنه نما نامیده می‌شود که مهمترین عنصر عمودی منظر شهری است [3].

در طراحی و ساخت یک ساختمان، بحث نما بسیار حائز اهمیت است. برخلاف روش‌های قدیمی در اجرای نمای خشک، برای اجرای نما از هیچ‌گونه ملات استفاده نمی‌شود. همان‌گونه که از عنوان متریکال نمای خشک مشخص است، تفاوت اصلی این نما با نمای معمولی (ملاتی) در نوع اتصال مصالح نما به سازه ساختمان است. به این ترتیب که در نمای خشک، سطح رویه یا همان نما (سرامیک، سنگ، سمنت برد و غیره) به وسیله یک سری اتصالات مکانیکی و تجهیزات (عمدتاً فلزی) به سازه ساختمان متصل می‌گردد. مصالحی که برای نمای خشک استفاده می‌شود عبارت‌اند از: سمنت برد، انواع سرامیک پرسلانی، ورق آلومینیوم، کاشی، آجرهای سفالی و غیره. این امر باعث می‌شود که نمای خشک دارای گستردگی تنوع رنگ و بافت بسیار زیادی باشد. یکی از دلایلی که نیاز به وجود سیستم اجرای نمای خشک را ایجاد کرد، سخت بودن اجرا و مشکلات متفاوتی بود که در اجرای نما به روش سنتی وجود داشت. برای مثال، ریختن نما بر اثر عوامل مختلف در اجرای نما به صورت ملاتی، یکی از مشکلات رایج این روش بود. از طرفی با توسعه و گسترش تولید و همچنین پیشرفت فناوری، محصولات قابل استفاده در نمای ساختمان به سمت مدرن شدن پیش رفتند و محصولاتی جدید برای نما تولید گردید که به وسیله مزایا و ویژگی‌های مختلف خود، توجه طراحان ساختمان و مهندسان معماری را به خود جلب کردند. اما با اجرای نما به صورت ملاتی محدودیت‌هایی برای انتخاب نوع مصالح به وجود می‌آمد. برای مثال، سرامیک‌های پرسلانی، جذب آب پایینی دارند که حداکثر ۰/۵ درصد است و به همین دلیل، میزان چسبندگی ملات سیمان به این نوع از مصالح در حد بسیار پایین و حتی صفر است. برخلاف روش‌های سنتی، در این سیستم برای اجرای نما خبری از ملات نیست. در حقیقت، در نمای خشک، نوعی سیستم نصب سبک با اتصالات مکانیکی جایگزین ملات برای نصب نما به ساختمان می‌شود. نمای خشک متشکل از لایه‌های متعددی است که شامل: پوسته بیرونی، فضای داخلی تهویه‌پذیر، لایه عایق حرارتی و دیواره داخلی ساختمان است. بنابراین، بین دیواره اصلی ساختمان و مصالحی که برای پوسته ساختمان استفاده می‌شود، فاصله‌ای تعیین شده وجود دارد. تمام لایه‌های نمای خشک با استفاده از سازه‌هایی از جنس فولاد و آلومینیوم، به سازه اصلی و اسکلت ساختمان نصب می‌شوند. اجرای نمای خشک شامل دو دسته مشهود یا نمایان و نامشهود یا غیرنمایان تقسیم‌بندی می‌شوند. در سیستم‌های نمای خشک نمایان، قسمتی از بست‌هایی که برای نگه داشتن سرامیک استفاده می‌شوند، از بیرون ساختمان هم قابل مشاهده هستند. البته راه‌هایی هم برای کاهش جلب توجه این بست‌ها وجود دارد، از جمله: رنگ کردن قسمت‌های نمایان بست به رنگ رویه نما. در صورت انجام دادن این کار، حتماً باید از رنگ‌های پایدار در برابر مسایل آب و هوایی استفاده شود،

چون این بست‌ها در معرض آسیب‌دیدگی بر اثر عوامل جوی قرار دارند. در اجرای سیستم نمای خشک غیرنمایان، پس از نصب نما، بست‌های مورد استفاده در نصب نما مشاهده نمی‌شوند. بدین گونه که قبل از نصب نما، بر روی سطح رویه ساختمان عملیات و مراحل انجام می‌شود که بسته به نوع روش اجرا، ممکن است به صورت حفره‌ها و یا شیارهایی در قسمت پشت یا لبه‌های رویی نما باشد.

۲- پیشینه تحقیق

استفاده از نمای خشک دارای محاسن و مزایایی است که از جمله آنها می‌توان به موارد ذیل اشاره نمود:

۲-۱- سرعت اجرای نما

از آن جایی که در نمای خشک از چهارچوب‌های فلزی به عنوان قالب و الگوی اجرای نما استفاده می‌شود، نما را می‌توان بدون استفاده از داربست آماده کرد. این روند باعث می‌شود تا سرعت اجرای نمای خشک به صورت قابل‌ملاحظه‌ای افزایش پیدا کند و تا ۵۰ درصد در زمان اجرای پروژه صرفه‌جویی خواهید داشت.

۲-۲- کیفیت بالا

یکی از مزیت‌های نمای خشک این است که برای اجرای آن می‌توان از هر نوع مصالحی، از جمله: کامپوزیت، آج پی ال^۱، سنگ، سرامیک، آجر، آلوکوتا^۲، چوب پلاست، چوب، سمنت برد، مش استرچ متال یا اکسپند متال^۳ و غیره به روش صنعتی استفاده کرد. این ویژگی نمای خشک سبب شده تا بسیاری از مشکلاتی که طراحان، مهندسان، متخصصان و مدیران پروژه‌ها با آن روبه‌رو هستند، برطرف شود و با استفاده از این مصالح در هر سایز، ضخامت و رنگی که لازم است، به بالا رفتن کیفیت نما و اجرای کامل طرح مورد نظر خود خواهند رسید. از طرفی، با تولید صنعتی مصالح مورد نیاز برای رویه نما و مقاطع زیرسازی نما از جمله پروفیل‌های آهنی، آلومینیومی یا گالوانیزه و استیل، با کاهش خطاهای انسانی و در نتیجه بالا رفتن کیفیت نهایی مصالح نمای اجرا شده مواجه می‌شویم.

۲-۳- کاهش اتلاف انرژی

به دلیل استفاده از عایق حرارتی در سیستم نمای خشک می‌توان اعلام کرد که این نما جلوی اتلاف انرژی ساختمان را می‌گیرد و باعث کاهش هزینه‌ها می‌شود. در این سیستم، ابتدا به صورت مستقل و با استفاده از چسب یا اتصالات مکانیکی، یک لایه عایق حرارتی به بدنه ساختمان متصل می‌شود. بعد از این اتصال چهارچوب یا اسکلت نگه‌دارنده که می‌تواند از جنس چوب، فولاد یا آلومینیوم باشد، روی ساختمان نصب می‌شود. با این روش فاصله‌ای

^۱ HPL به صفحاتی اطلاق می‌شود که از ترکیب لایه‌های سلولزی و رزین‌های فنولیک به وجود می‌آیند، این ترکیب پس از قرار گرفتن در دمای بالای ۱۸۰°C و فشار بار ۲۰ تا ۸۰ تبدیل به صفحاتی محکم با مشخصات فنی ویژه می‌گردد. سطوح نهایی این صفحات توسط لایه‌های رنگین و پوشش ضدخش پوشانده می‌شود.

^۲ نمای Alucotta با استفاده از پروفیل‌های آلومینیومی اجرا می‌شود. این سیستم که بسیار زیبا و لاکچری طراحی شده در هر نوع ساختمانی چه در داخل و چه بیرون قابل استفاده است.

^۳ مش استرچ متال یا اکسپند متال محصولاتی هستند که به عنوان یک روش خاص در نمای بیرونی ساختمانها استفاده می‌شوند، به ویژه به عنوان پوسته فلزی روی نما.

معین میان نمای خشک و عایق حرارتی وجود خواهد داشت که خود این فضای خالی هم عایقی در برابر اتلاف انرژی است.

۴-۲- قابلیت تعویض یا تعمیر نما

چنانچه المانی از پوشش نمای خشک آسیب ببیند، به راحتی می‌توان قسمت کوچکی از پوشش و نما را باز کرد. در صورتی که قابلیت تعمیر وجود داشت، می‌توان آسیب آن ناحیه را برطرف نمود و یا در صورت غیرقابل تعمیر بودن، آن قسمت را به طور کامل با قطعه‌ای جدید تعویض کرد. این قابلیت در بسیاری از انواع نماهای دیگر وجود ندارد و در صورت آسیب دیدن قسمتی از نما، مجبور به پرداخت هزینه‌ی زیادی برای تعویض کامل آن خواهید شد.

۵-۲- نصب آسان

برای نصب سیستم نمای خشک نیاز به کارگر حرفه‌ای نیست، چرا که نصب آجر و ریل‌ها در این سیستم، به صورت مکانیکی است. بنابراین، در نصب آن دغدغه‌ی خاصی وجود نخواهد داشت و خبری از دستمزدهای بسیار گزاف نیست.

۶-۲- عدم ایجاد ضایعات ساختمانی و آلودگی صوتی

از آنجایی که سیستم نمای خشک به صورت مستقیم روی دیوار ساختمان قابل اجراست و نیاز به برداشتن سطح دیوار موجود نیست، اجرای این سیستم هیچ نوع ضایعات یا زباله‌ی ساختمانی ایجاد نمی‌کند و مزاحمتی از نوع آلودگی صوتی برای دیگران ندارد.

۷-۲- قابلیت اجرا

همان‌طور که قبلاً توضیح داده شد، برای ساختمان‌های مرتفع در این سیستم از ملات استفاده نمی‌شود. به همین دلیل، برای پروژه‌ها و ساختمان‌های مرتفع بسیار سریع و آسان‌تر از سایر نماها، مانند: نمای آجری می‌توان نمای خشک را نصب کرد [۴].

در ادامه، به بررسی وضعیت پایداری در نمای کرتین وال در سازه‌های ساختمانی پرداخته شد. نمای کرتین وال که از نماهای خشک محسوب می‌شود، به ویژگی‌هایی اشاره نموده که عبارت‌اند از: عایق کامل رطوبتی و حرارتی و صوتی، بهینه‌سازی در انتقال نور و دمای محیط، کاهش مصرف انرژی، سبکی ساختار و کاهش بار مرده ساختمان، سرعت بالای اجرا، زیبایی و جذابیت زیاد در شب و روز، مقرون به صرفه بودن، رفتار تنشی مناسب در مقابل نیروی زلزله، نهایت استفاده از شفافیت نور در روز، امکان نصب بازشو، امکان استفاده از طیف عظیم طرح‌ها و رنگ‌های شیشه، و امکان ترکیب آسان با سایر پوشش‌های نما.

در خصوص ملاحظات طراحی ساختمان‌های بلند تحقیقات گسترده‌ای انجام شده است. در مبحث حریق نیز در طراحی ساختمان‌های بلند از دیدگاه ایمنی در مقابل آتش‌سوزی باید به کنترل دود و آتش‌سوزی در فضاهای عمومی و راه‌های فرار توجه کرد، که نمای این ساختمان‌ها به دلیل تأثیری که در فضاهای داخلی ساختمان و محیط اطراف خود دارد، بایستی مقاومت لازم را در برابر حریق و گسترش آن داشته باشد.

سیستم کرتین وال فریم لس کانال یو از سیستم‌های سبک و مقرون به صرفه شناخته شده که به لحاظ فنی، اجرای آن در ساختمان‌های با ارتفاع بالا توصیه نمی‌شود و با توجه به نوع اتصال شیشه و میزان تحمل بار در این سیستم ابعاد مدول‌ها می‌بایست به صورت محدود و حتی‌الامکان با

ارتفاع کم در نظر گرفته شود. در حالتی که نمای کرتین وال از جلوی لبه دال یکسره عبور می‌کند، باید بین لب دال و دیواره نما به طور کامل پر شود که به این سیستم مانع حریق (آتش بند) محیطی گفته می‌شود [5].

به بررسی نمای خشک سرامیک پرداخته شده و در پژوهش اشاره گردیده است که در سیستم نمای خشک برای اتصال المان‌ها به یکدیگر از ملات استفاده نمی‌شود. برای اتصال المان‌های مخصوصی که در این سیستم به کار می‌روند، از تجهیزات فلزی مانند ریل استفاده می‌شود. صنعت نمای خشک امروزه زیبایی و نوع طراحی نماهای ساختمان نشان‌دهنده رتبه‌کاری، نوع فعالیت و حتی طرز فکر، ایده‌ها و دیدگاه‌های مدیران آن مؤسسه و سازمان می‌باشد. از این رو مدیران ارشد شرکت‌ها علاوه بر روش‌های نوین تبلیغات می‌کوشند تا نوع، محل و به‌ویژه نمای ساختمان مرکزی سازمان خود را به‌گونه‌ای طراحی و انتخاب نمایند تا نشان‌دهنده نوع و اهمیت فعالیت آنها باشد [6].

به بررسی نماهای دو پوسته در اقلیم گرم و خشک پرداخته شده و مسأله برافروختگی در حفره بین دو پوسته در ماه‌های گرم سال، از چالش‌های استفاده از این سیستم در اقلیم گرم و خشک ایران است. طراحی این نما با انجام دادن مطالعات تکمیلی از قبیل بررسی تأثیر دریچه تهویه و عمق حفره و یا سایه‌اندازی مناسب، می‌تواند در مناطق گرم و خشک عملکرد مناسبی داشته باشد. این پژوهش ضمن مقایسه عملکرد حرارتی ساختمان دارای نمای دو پوسته با ساختمان فاقد آن، به تعیین استراتژی‌های کاربرد نمای دو پوسته در ساختمان‌های واقع در اقلیم گرم و خشک می‌پردازد. روش استفاده شده در این تحقیق، مدل‌سازی و دو محاسبات نرم‌افزاری است. به منظور بررسی و تحلیل نتایج محاسبات قبلی، اتاقکی دارای نمای دو پوسته شبیه‌سازی شد. نتایج حاکی از آن مدل ساخته شده عادی و اتاقکی فاقد نمای دو پوسته در نرم‌افزار از مدل بدون ۱۴/۴ کیلووات بر مترمربع بود که مقدار کل مصرف انرژی اتاقک دارای پوسته دوجداره بهبود یافته، پوسته دوجداره کمتر است. این موضوع نشان می‌دهد این نما در صورت طراحی مناسب می‌تواند حتی در مناطق گرم و خشک عملکرد مناسبی داشته باشد. لذا انجام دادن مطالعات تکمیلی از قبیل بررسی تأثیر دریچه تهویه و عمق حفره و یا سایه‌اندازی مناسب می‌تواند تأثیر بسزایی در کاهش برافروختگی در حفره بین دو پوسته و افزایش عملکرد این نما در اقلیم گرم و خشک داشته باشد [7, 8].

در پژوهش‌های خارجی برای بررسی در نماهای خشک، می‌توان به پژوهش‌های راتیج در سال ۲۰۱۹ اشاره نمود که به ارزیابی تغییرهای دما و رطوبت نسبی در نمای سبز ساختمان پرداخت و نتایج حاصل از پژوهش وی برای استفاده از نمای سبز مستلزم سیستم خنک‌کننده است که سبب افزایش مصرف انرژی می‌شود و در نتیجه، افزایش هزینه را به همراه دارد. اطلاعات به دست آمده از طریق اندازه‌گیری میدانی حاصل گردید. همچنین، استفاده از سیستم‌های حرارتی با توجه به شرایط اقلیمی استفاده از نماهای سبز را از دایره انتخاب خارج می‌نماید [9].

در سال ۲۰۱۹ به ارزیابی عملکرد شیشه نیمه‌شفاف کادمیوم تلوراید^۱ بر پایه صرفه‌جویی در مصرف برق در نمای ساختمان‌ها پرداخته شد. استفاده از

^۱ سلول‌های خورشیدی با صفحه نازک (کادمیوم تلوراید) یکی از قابل رقابت‌ترین قطعات فتوولتائیک هستند که از نظر هزینه و ضریب عملکرد مورد توجه هستند.

اصلی در نظر گرفته شده می‌باشد. به دلیل محدودیت در جامعه آماری نیز از روش تمام شماری همان تعداد ۲۰ نفر به عنوان حجم نمونه انتخاب می‌شوند. روش فرایند تحلیل سلسله مراتبی فازی روشی برای تحلیل ماتریس مقایسه زوجی با استفاده از منطق فازی است. در روش مرسوم فرایند تحلیل سلسله مراتبی از شایستگی‌ها و توانایی‌های ذهنی افراد خبره برای انجام دادن مقایسه استفاده می‌شود. اما باید به این نکته توجه داشت که مقایسه زوجی به روش سنتی، امکان انعکاس سبک تفکر انسانی را به‌طور کامل ندارد.

استفاده از اعداد فازی سازگاری بیشتری با عبارات کلامی و گاه مبهم انسانی دارد. بنابراین، بهتر است که با به‌کارگیری اعداد فازی به تصمیم‌گیری در دنیای واقعی پرداخت. در بحث روایی و پایایی پرسش‌نامه و در قسمت روایی از نظرهای کارشناسان خبره و استادان محترم دانشگاهی استفاده شده است. در بخش پایایی به جای استفاده از شاخص‌های پایایی از نرخ ناسازگاری به جهت استفاده از پرسش‌نامه مقایسه زوجی استفاده شده است و نرخ ناسازگاری در کلیه زیرمعیارهای پژوهش کوچکتر از ۰/۱ حاصل شده است و کلیه معیارهای در نظر گرفته شده با یکدیگر سازگارند.

۴- معیارهای اصلی انتخاب نمای بیرونی ساختمان

معیارهای اصلی انتخاب نمای بیرونی ساختمان در جدول شماره ۱ ارائه شده است:

جدول ۱ مؤلفه‌های اصلی انتخاب نمای خشک

Table 1 Main components of dry facade selection

مؤلفه	مشخصه
C1:	دمای داخلی ساختمان
C2:	هزینه‌ها
C3:	فرسایش و دوام
C4:	مدت زمان اجرا
C5:	نیروی انسانی
C6:	دسترسی به مصالح تشکیل‌دهنده نما
C7:	زیبایی منظر و جذب مخاطب

همچنین، جدول ۲ به معرفی زیرمعیارها و محاسبه نرخ سازگاری پژوهش می‌پردازد:

جدول ۲ معرفی زیرمعیارها و محاسبه نرخ سازگاری پژوهش

Table 2 Introduction of sub-criteria and calculation of research adaptation rate

CR	مشخصه	شرح زیرمعیار
0.012	S11	حفظ انرژی داخلی ساختمان
0.009	S12	پسماندهای ساخت
0.008	S13	تأثیرپذیری از شرایط اقلیمی
0.008	S14	عایق حرارتی
0.013	S15	عایق صوتی
0.013	S16	ایمنی
0.021	S21	هزینه‌های طراحی و دفترچه نما
0.021	S22	هزینه‌های تأمین و حمل و بارگیری
0.026	S23	هزینه‌های تعمیرات و نگهداری

مواد نیمه‌شفاف فتوولتائیک^۱، از خواص نوری و الکتریکی با تولید برق از نور خورشید برای استفاده در محیط داخلی استفاده می‌کند و در مصرف برق حدود ۲۰ درصد صرفه‌جویی را به همراه دارد [10].

در سال ۲۰۱۹ به تأثیر نمای شیشه‌ای در محیط داخلی ساختمان‌ها در مناطق گرم پرداخته شد و در آن اشاره گردید که طراحی نمای شیشه بدون توجه به شرایط آب‌وهوایی، سبب هدر رفت انرژی خواهد شد [11]. پوسته‌های ساختمانی مرز بین فضای داخل و خارج ساختمان هستند و نقش مؤثری در کاهش مصرف انرژی بر عهده دارند. نمای دو پوسته یکی از گزینه‌ها به عنوان پوسته ساختمانی است. اصطلاح نمای دو پوسته در واقع همان ایده نمای انعطاف‌پذیر متشکل از دو جداره مختلف است که با یک حفره میانی از هم جدا می‌شوند. حفره میانی وظایف جمع‌آوری تابش خورشیدی در زمستان (اثر گلخانه‌ای) یا تخلیه آن در تابستان را بر عهده دارد [۱۳، ۱۲].

نمای دو پوسته شامل یک لایه داخلی و یک پوسته اضافی است که به‌طور معمول، پوسته خارجی شفاف است که توسط یک حفره هوا جدا می‌شود و ممکن است به عنوان یک نوار حرارتی به عنوان یک کانال تهویه یا اغلب به عنوان ترکیبی از آن دو، عمل کند. علاوه بر این حفره اغلب دستگاه‌های سایه‌دار مانند پرده‌ها را برای محافظت از اتاق‌های داخلی از گرمای بیش از حد از طریق افزایش خورشید استفاده می‌کند [14، 15].

معماران و مهندسان ساختمان معتقدند که استفاده از فضاهای دو پوسته می‌تواند تهویه مناسب‌تر و عایق حرارتی، بارگیری‌های خنک‌کننده و مصرف انرژی را کاهش دهد، نور روز را تسهیل کند و کنترل نویز را افزایش دهد [16].

استفاده از این سیستم‌ها با ویژگی‌های مختلف معماری می‌تواند عملکرد حرارتی کل سیستم را بهبود بخشد و حدود ۳۰ درصد کاهش مصرف انرژی را فراهم کند [17].

۳- روش تحقیق

استفاده از نمای خشک در ساختمان مزایای دیگری هم دارد. در این مقاله، قابلیت اجرا برای ساختمان‌های بلندمرتبه مورد بحث و ارزیابی قرار می‌گیرد که معیارهای اصلی پژوهش شامل افزایش عمر ساختمان، کاهش وزن سازه، حذف پرتی مصالح، سازگاری با دمای محیط، امکان بازیافت مصالح، یکپارچه و به هم پیوسته بودن سطح زیرین و سطح ساختمان، سازگاری با سیستم فلزی یا بتنی سازه است. پژوهش حاضر از دسته پژوهش‌های کاربردی است. روش تحقیق حاضر کتابخانه‌ای و میدانی است. ابزار گردآوری اطلاعات نیز در بخش کتابخانه‌ای سایت‌های معتبر اینترنتی، مقالات و مراجع معتبر داخلی و خارجی است. در بخش میدانی نیز از پرسش‌نامه مقایسه زوجی با نظرسنجی از ۲۰ نفر از کارشناسان خبره که در زمینه اجرای نما فعالیت دارند انتخاب می‌شود.

دلیل انتخاب تعداد محدود ۲۰ نفر استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی ۳ و تأسیس فازی در اولویت‌بندی و تصمیم‌گیری در معیارها و زیرمعیارهای

^۱ سلول‌های خورشیدی از نوع نیمه‌رسانا هستند که از سیلیسیوم ساخته می‌شوند، سلول فتوولتائیک از چندین لایه نازک سیلیکون ساخته شده و زمان برخورد نور خورشید الکترون درون سلول جدا می‌شود. با جذب کردن نور، الکترون اتم سیلیکون منحرف می‌شود و حفره مثبت را برجا می‌گذارد.

C4	(1.22, 1.57, 1.94)	(1.77, 2.09, 2.38)	(1.18, 1.57, 2.11)	(1, 1, 1)	(1.16, 1.47, 1.79)	(0.39, 0.48, 0.56)	(0.39, 0.47, 0.56)	S24	0.014	هزینه نصب و افراد بامهارت و باتجربه
								S25	0.016	تأثیرپذیری از افزایش قیمت‌ها و تورم
								S31	0.021	کیفیت مصالح
								S32	0.024	روش ساخت
C5	(1.94, 2.41, 2.81)	(0.99, 1.19, 1.44)	(1, 1, 1)	(0.47, 0.64, 0.85)	(0.92, 1.28, 1.75)	(0.51, 0.58, 0.66)	(0.6, 0.69, 0.78)	S33		مقاومت مصالح در برابر عوامل محیطی
								S41	0.089	مدت زمان اجرا، دسترسی به مصالح
								S42	0.014	تشکیل‌دهنده نما
								S43	0.015	مدت زمان اجرا و تعویض و تعمیر
C6	(1.03, 1.24, 1.5)	(1, 1, 1)	(0.7, 0.84, 1.01)	(0.42, 0.48, 0.56)	(0.73, 0.88, 1.04)	(0.43, 0.52, 0.63)	(0.39, 0.49, 0.64)	S44	0.013	مدت زمان اجرا، ماندگاری
								S51	0.013	وابستگی به وجود افراد بامهارت و باتجربه
								S52	0.021	تعداد نیروی انسانی مورد نیاز
								S61	0.021	وجود مواد اولیه در داخل کشور
C7	(1, 1, 1)	(0.67, 0.81, 0.97)	(0.36, 0.42, 0.51)	(0.52, 0.64, 0.82)	(0.7, 0.87, 1.05)	(0.71, 0.92, 1.21)	(0.45, 0.54, 0.67)	S62	0.026	فقدان منابع تأمین خارجی
								S63	0.014	دسترسی به ابزارهای ساخت
								S64	0.016	دسترسی به دانش فنی
								S71	0.026	تنوع رنگ و ظاهر نما
								S72	0.014	قابلیت ایجاد بارشو

۵- نتایج تحلیل داده‌ها

در این بخش از روش سلسله مراتبی فازی و تاپسیس فازی به اولویت‌بندی معیارها و زیرمعیارهای معرفی شده در بخش قبل پرداخته می‌شود (جدول ۳):

جدول ۳ ماتریس مقایسه زوجی‌های اصلی پژوهش
Table 3 Comparison matrix of the main research pairs

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
C1	(1, 1, 1)	(0.61, 0.76, 1)	(3.66, 4.56, 5.42)	(1.77, 2.15, 2.53)	(1.28, 1.46, 1.66)	(1.57, 2.05, 2.55)	(1.5, 1.86, 2.22)
C2	(1, 1.31, 1.63)	(1, 1, 1)	(3.5, 3.92, 4.4)	(1.79, 2.1, 2.55)	(1.51, 1.72, 1.95)	(1.58, 1.94, 2.33)	(0.83, 1.09, 1.42)
C3	(0.18, 0.22, 0.27)	(0.23, 0.26, 0.29)	(1, 1, 1)	(0.56, 0.68, 0.87)	(0.57, 0.78, 1.09)	(0.96, 1.13, 1.37)	(0.95, 1.15, 1.43)

پس از تشکیل ماتریس مقایسه‌های زوجی به دست آمده، بردار ویژه محاسبه گردیده است. ابتدا بسط فازی هر سطر محاسبه می‌شود. هر درایه ماتریس مقایسه زوجی $\tilde{X}$ به صورت $\tilde{x}_{ij}$ نمایش داده می‌شود. بسط فازی هر سطر نیز با نماد $\tilde{S}_i$ نمایش داده شده است. بنابراین، بسط فازی هر سطر به صورت زیر محاسبه خواهد شد (رابطه ۱):

$$\tilde{S}_i = \sum_{j=1}^n x_{ij} \quad (1)$$

برای نرمال‌سازی ترجیحات هر معیار، باید مجموع مقادیر آن معیار بر مجموع تمامی ترجیحات (عناصر ستون) تقسیم شود. چون مقادیر فازی هستند، بنابراین، جمع فازی هر سطر در معکوس مجموع ضرب می‌شود (رابطه ۲).

$$\tilde{F}^{-1} = \left(\frac{1}{u}, \frac{1}{m}, \frac{1}{l} \right) \quad \text{آنگاه} \quad \tilde{F} = (l, m, u) \quad (2)$$

بنابراین، بر اساس رابطه ۳ خواهیم داشت:

$$\left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n x_{ij} \right)^{-1} = (0.02, 0.017, 0.014) \quad (3)$$

$$x_{\max}^1 = \frac{l+m+u}{3}; \quad x_{\max}^2 = \frac{l+2m+u}{4}; \quad x_{\max}^3 = \frac{l+4m+u}{6} \quad (4)$$

$$\text{Crisp number} = Z^* = \max \{ x_{\max}^1, x_{\max}^2, x_{\max}^3 \}$$

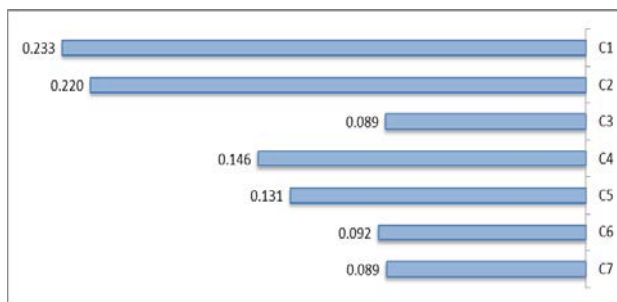


Fig. 2 Ranking of building indoor temperature sub-criteria

شکل ۲ رتبه‌بندی زیرمعیارهای دمای داخلی ساختمان

۶-۲- هزینه‌ها

بر اساس جداول شماره ۲ و ۴ رتبه‌بندی زیرمعیارهای هزینه‌ها در انتخاب نمای خشک به شرح جدول ۶ ذیل است:

جدول ۶ رتبه‌بندی زیرمعیارهای اصلی هزینه‌ها

Table 6 Ranking of the main sub-criteria costs

Normal	De-fuzzy	X3max	X2max	X1max	Crisp
0.254	0.268	0.264	0.266	0.268	S21
0.168	0.176	0.174	0.175	0.176	S22
0.166	0.173	0.170	0.172	0.173	S23
0.242	0.256	0.254	0.255	0.256	S24
0.17	0.177	0.175	0.176	0.177	S25

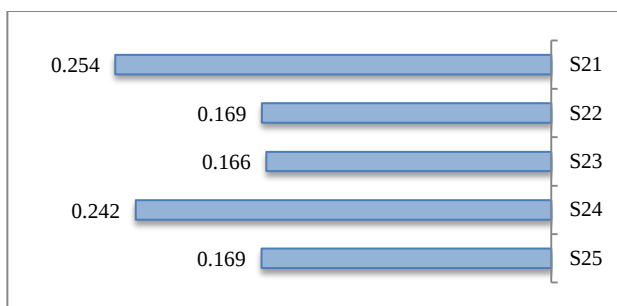


Fig. 3 Ranking of sub-criteria of costs

شکل ۳ رتبه‌بندی زیرمعیارهای هزینه‌ها

۶-۳- فرسایش و دوام

بر اساس جداول شماره ۲ و ۴ رتبه‌بندی زیرمعیارهای فرسایش و دوام در انتخاب نمای خشک به شرح جدول ۷ ذیل است:

برای نرمال نمودن مقادیر فازی به‌دست آمده جدول ۴ ذیل تنظیم می‌شود:

جدول ۴ فازی‌زدایی اوزان نرمال محاسبه‌شده اصلی مطالعه

Table 3 De-fuzzy normal weights of the main calculated study

Crisp	X1max	X2max	X3max	De-fuzzy	Normal
C1	0.242	0.240	0.238	0.242	0.233
C2	0.229	0.227	0.225	0.229	0.220
C3	0.093	0.092	0.090	0.093	0.089
C4	0.152	0.150	0.149	0.152	0.146
C5	0.137	0.135	0.134	0.137	0.131
C6	0.096	0.095	0.094	0.096	0.092
C7	0.092	0.091	0.090	0.092	0.088

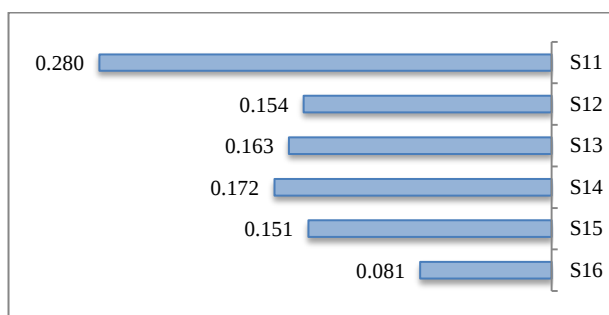


Fig. 1 Graphic representation of the main research priorities

شکل ۱ نمایش گرافیکی اولویت‌های اصلی پژوهش

پس از اولویت‌بندی معیارها به اولویت‌بندی زیرمعیارهای معرفی شده در هر شاخه اصلی پرداخته می‌شود و برای خلاصه نمودن نتایج از ارایه جداول مقایسه زوجی صرف‌نظر شده و جداول فازی‌زدایی هر یک از معیارهای اصلی آورده شده است.

۶- معیارهای اصلی انتخاب نمای بیرونی ساختمان

۶-۱- دمای داخلی ساختمان

بر اساس جداول شماره ۲ و ۴، رتبه‌بندی زیرمعیارهای دمای داخلی ساختمان در انتخاب نمای خشک به شرح جدول ۵ زیر است:

جدول ۵ رتبه‌بندی زیرمعیارهای دمای داخلی ساختمان

Table 5 Ranking of building indoor temperature sub-criteria

Crisp	X1max	X2max	X3max	Deffuzy	Normal
S21	0.268	0.266	0.264	0.268	0.254
S22	0.176	0.175	0.174	0.176	0.168
S23	0.173	0.172	0.170	0.173	0.166
S24	0.256	0.255	0.254	0.256	0.242
S25	0.177	0.176	0.175	0.177	0.17

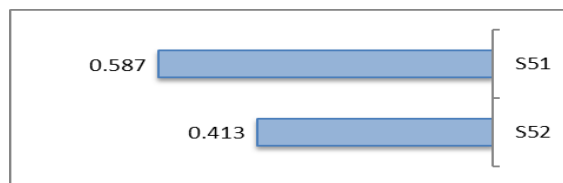


Fig. 6 Ranking of human resources sub-criteria

شکل ۶ رتبه‌بندی زیرمعیارهای نیروی انسانی

۶-۶- دسترسی به مصالح تشکیل‌دهنده نما

بر اساس جداول شماره ۲ و ۴ رتبه‌بندی زیرمعیارهای دسترسی به مصالح تشکیل‌دهنده نما در انتخاب نمای خشک به شرح جدول ۱۰ ذیل است:

جدول ۱۰ رتبه‌بندی زیرمعیارهای دسترسی به مصالح تشکیل‌دهنده نما

Table 10 Ranking of sub-criteria for access to facade materials

Crisp	X1max	X2max	X3max	De-fuzzy	Normal
S61	0.359	0.358	0.357	0.359	0.345
S62	0.279	0.277	0.276	0.279	0.267
S63	0.238	0.234	0.23	0.238	0.227
S64	0.167	0.165	0.163	0.167	0.161

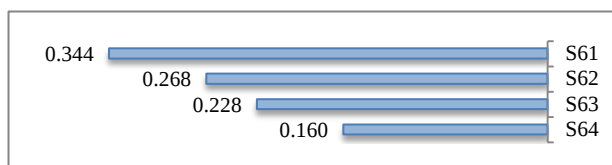


Fig. 7 Ranking of sub-criteria for access to facade materials

شکل ۷ رتبه‌بندی زیرمعیارهای دسترسی به مصالح تشکیل‌دهنده نما

۶-۷- زیبایی منظر و جذب مخاطب

بر اساس جداول شماره ۲ و ۴ رتبه‌بندی زیرمعیارهای زیبایی منظر و جذب مخاطب در انتخاب نمای خشک به شرح جدول ۱۱ ذیل است:

جدول ۱۱ رتبه‌بندی زیرمعیارهای زیبایی منظر و جذب مخاطب

Table 11 Ranking of sub-criteria of landscape beauty and audience attraction

Crisp	X1max	X2max	X3max	De-fuzzy	Normal
S71	0.643	0.640	0.637	0.643	0.631
S72	0.377	0.375	0.373	0.377	0.369

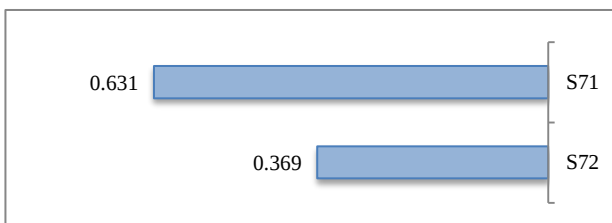


Fig. 8 Ranking of sub-criteria of landscape beauty and audience attraction

شکل ۸ رتبه‌بندی زیرمعیارهای زیبایی منظر و جذب مخاطب

جدول ۷ رتبه‌بندی زیرمعیارهای فرسایش و دوام

Table 7 Ranking of erosion and durability sub-criteria

Crisp	X1max	X2max	X3max	De-fuzzy	Normal
S31	0.586	0.585	0.584	0.586	0.552
S32	0.269	0.268	0.267	0.269	0.255
S33	0.205	0.204	0.203	0.205	0.193

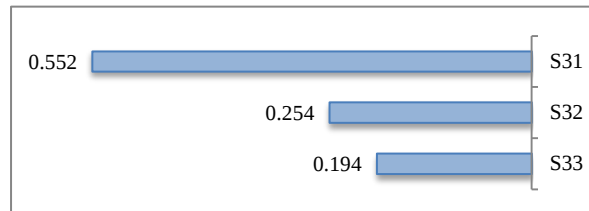


Fig. 4 Ranking of erosion and durability sub-criteria

شکل ۴ رتبه‌بندی زیرمعیارهای فرسایش و دوام

۶-۴- مدت زمان اجرا

بر اساس جداول شماره ۲ و ۴ رتبه‌بندی زیرمعیارهای مدت زمان اجرا در انتخاب نمای خشک به شرح جدول ۸ ذیل است:

جدول ۸ رتبه‌بندی زیرمعیارهای مدت زمان اجرا

Table 8 Ranking of implementation time sub-criteria

Crisp	X1max	X2max	X3max	De-fuzzy	Normal
S41	0.403	0.401	0.4	0.403	0.383
S42	0.260	0.259	0.258	0.26	0.247
S43	0.264	0.263	0.261	0.264	0.252
S44	0.125	0.123	0.121	0.125	0.118

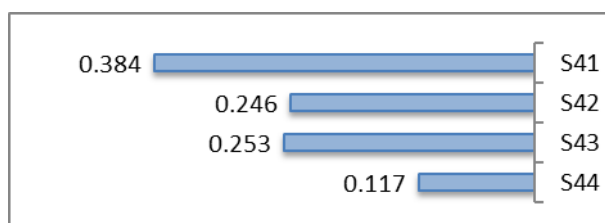


Fig. 5 Ranking of runtime sub-criteria

شکل ۵ رتبه‌بندی زیرمعیارهای مدت زمان اجرا

۶-۵- نیروی انسانی

بر اساس جداول شماره ۲ و ۴ رتبه‌بندی زیرمعیارهای نیروی انسانی در انتخاب نمای خشک به شرح جدول ۹ ذیل است:

جدول ۹ رتبه‌بندی زیرمعیارهای نیروی انسانی

Table 9 Ranking of human resources sub-criteria

Crisp	X1max	X2max	X3max	De-fuzzy	Normal
S51	0.596	0.594	0.592	0.596	0.588
S52	0.421	0.419	0.417	0.421	0.412

جذب مخاطب	S72	0.369	0.032	18
-----------	-----	-------	-------	----

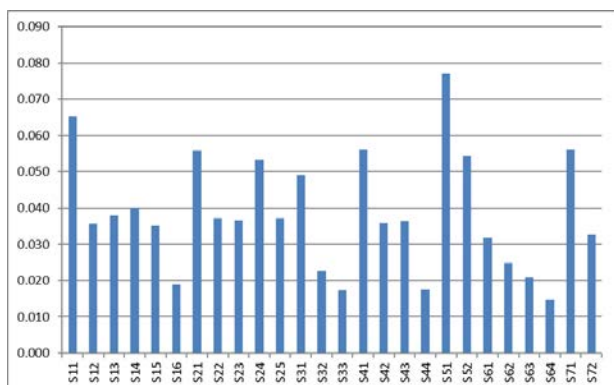


Fig. 9 Final ranking of sub-criteria

شکل ۹ رتبه نهایی زیرمعیارها

استفاده از نمای خشک با توجه به معیارهای اولویت‌بندی شده در انواع نماهای خشک دسته‌بندی شده به صورت جدول ۱۳ ذیل با استفاده از روش تاپسیس رتبه‌بندی می‌گردند. وزن‌دهی و رتبه‌بندی به روش تاپسیس بر اساس بیشترین فاصله تا هدف غایی منفی و کمترین فاصله با هدف غایی مثبت انجام می‌شود:

- نمای ترکیبی رومی با آجر (A1)
- نمای بلوکی (A2)
- نمای ترکیبی سنگدانه‌های تگرگی رودخانه‌ای و رنگی (A3)
- نمای استیل (A4)
- نمای دو پوسته (A5)
- نمای کرتین وال (A6)
- نمای ترکیبی چوب و شیشه و رومی (A7)
- نمای تیشه‌ای یا چکشی (A8)
- نمای طبیعی یا مصنوعی گیاهی یا سبز (A9)

جدول ۱۳ اولویت‌بندی به روش تاپسیس

Table 13 Prioritization by TOPSIS method

رتبه	ضریب نزدیکی	فاصله تا ایده‌آل منفی	فاصله تا ایده‌آل مثبت	نوع نما
۲	۶۵۹.۰	۲۶۲.۰	۱۳۴.۰	ترکیبی رومی با آجر
۷	۴۷۴.۰	۱۸۹.۰	۲۱۱.۰	نمای بلوکی
۹	۴۰۹.۰	۱۶۲.۰	۲۳۵.۰	سنگدانه‌های تگرگی رودخانه‌ای و رنگی
۸	۴۲۹.۰	۱۷۳.۰	۲۲۹.۰	نمای استیل
۱	۶۷۵.۰	۲۶۸.۰	۱۲۹.۰	نمای دو پوسته
۵	۴۹۹.۰	۲۰.۰	۱۹۸.۰	نمای کرتین وال
۶	۴۷۵.۰	۱۸۹.۰	۲۱۰.۰	نمای ترکیبی چوب و شیشه و رومی

در رتبه‌بندی زیبایی منظر و جذب مخاطب زیرمعیار تنوع رنگ و ظاهر نما در جایگاه اول قرار دارد و در اولویت‌بندی نهایی زیرمعیارها در جدول ۱۲ خلاصه می‌گردد:

جدول ۱۲ تعیین اولویت نهایی شاخص‌ها با تکنیک FAHP^۱

Table 12 Determining the final priority of indicators with FAHP technique

معیارها	وزن معیارها	SubCriteria	W	Total W	Rank
دمای داخلی ساختمان	0.233	S11	0.281	0.064	2
		S12	0.154	0.035	16
		S13	0.162	0.037	10
		S14	0.167	0.041	9
		S15	0.139	0.034	17
		S16	0.097	0.02	23
هزینه‌ها	0.220	S21	0.254	0.055	5
		S22	0.168	0.038	12
		S23	0.166	0.038	13
		S24	0.242	0.052	7
		S25	0.17	0.036	11
فرسایش و دوام	0.089	S31	0.552	0.05	8
		S32	0.255	0.024	21
		S33	0.193	0.016	25
		S41	0.383	0.057	3
مدت زمان اجرا	0.146	S42	0.247	0.034	15
		S43	0.252	0.035	14
		S44	0.118	0.018	24
		S51	0.588	0.076	1
نیروی انسانی	0.131	S52	0.412	0.055	6
		S61	0.345	0.033	19
		S62	0.267	0.024	20
		S63	0.227	0.022	22
دسترسی به مصالح تشکیل دهنده نما	0.092	S64	0.161	0.014	26
		S71	0.631	0.057	4
زیبایی منظر و	0.089				

^۱ فرآیند تحلیل سلسله مراتبی فازی (FAHP) عبارت است از فازی‌سازی روش AHP کلاسیک با استفاده از اعداد و محاسبات فازی. هنگامی که اولویت‌ها عدم اطمینان و عدم دقت را نشان می‌دهند، اعداد قطعی و دقیق برای نشان دادن قضاوت زمانی خیلی مناسب نیست. در جهت مقابله با ابهام، اعداد فازی مثلثی و AHP در روش فازی برای حل تصمیم‌گیری مسائل ادغام شده‌اند.

جایگاه نهایی زیرمعیارهای پژوهش با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی فازی زیرمعیار وابستگی به وجود افراد با مهارت و تجربه، و با تجربه در جایگاه اول قرار دارد. سپس، می‌توان به زیرمعیار حفظ انرژی داخلی ساختمان در جایگاه دوم، سپس زیرمعیار مدت زمان اجرا، دسترسی به مصالح تشکیل‌دهنده نما در جایگاه سوم اشاره نمود. زیرمعیار دسترسی به دانش فنی از کمترین اهمیت برخوردار است.

با استفاده از روش تاپسیس فازی نمای دو پوسته در جایگاه با اهمیت انتخاب می‌شود. بنابراین، زیرمعیار وابستگی به وجود افراد با مهارت و با تجربه در جایگاه اول قرار دارد. سپس، می‌توان به زیرمعیار حفظ انرژی داخلی ساختمان در جایگاه دوم، سپس زیرمعیار مدت زمان اجرا دسترسی به مصالح تشکیل‌دهنده نما در جایگاه سوم اشاره نمود. زیرمعیار دسترسی به دانش فنی از کمترین اهمیت برخوردار است و در روش تاپسیس و در نمای دو پوسته نسبت به سایر نماهای خشک اولویت دارد.

۸- منابع

- [1] H. Zamani, *Guide to preparing an urban landscape management framework aimed at promoting visual identity*, Master Thesis in Urban Design, Faculty of Architecture and Urban Planning, Shahid Beheshti University, 2011. (in Persian فارسی)
- [2] M. Khakzand, M. Mohammadi, F. Jam, K. Aghabozorgi, Identification of factors affecting body design: A city with an emphasis on aesthetic and environmental dimensions, *Journal of Urban Studies*, pp. 1-10, 2014. (in Persian فارسی)
- [3] E. Souri, J. Pakzad, Codification of lighting criteria for facades of residential buildings in Tehran, Tehran Municipality Beautification Organization, Tehran, 2011. (in Persian فارسی)
- [4] <https://salco-company.com>
- [5] M. Aslanabadi, An Investigation on the stability of the curtain wall facade in building structures, *Studies of Geography, Civil Engineering and Urban Management*, Vol. 5, No. 1, pp. 83-94, Spring 1398. (in Persian فارسی)
- [6] Sh. Aghaeizadeh, Dry Ceramic Facade, *Sixth International Conference on Research in Science and Engineering and Third International Congress on Civil Engineering*, Architecture and Urban Planning of Asia, 1400. (in Persian فارسی)
- [7] F. Shakeri, Using a two-shell facade in the design of hot and dry climate architecture, *the First National Conference on Architecture and Urban Planning: ideas, theories and methods*, Malayer, 2016. (in Persian فارسی)
- [8] S. M. Madahi, M. Abbasi, Analysis of the thermal behavior of the outer shell - showing the building with traditional and modern materials and technologies with the aim of optimizing energy consumption, case study: Residential buildings in Mashhad, Iran, *Scientific Journals System*, No. 29, 1398. <https://iranjournals.nl.ai.ir/handle/123456789/418136> (in Persian فارسی)
- [9] W. Ratih, Z. Juliana, C. Wahyu, Data on records of temperature and relative humidity in a building model with green facade systems, *Journal of Data in Brief*, Available online, 2019.
- [10] H. Alrashidi, W. Issa, N. Sellami, A. Ghosh, T. Mallic, S. Sundaram, Performance Assessment of Cadmium Telluride-based Semi-Transparent Glazing for Power Saving in Facade, 2019. <https://iranjournals.nl.ai.ir/handle/123456789/418136>
- [11] M. Ahmed, A. E. D. AhmedSayed, M. AnwarFikry, Impact of glass facades on internal environment of buildings in hot arid zone, *Alexandria Engineering Journal*, Vol. 58, Issue 3, September 2019.
- [12] E. Gratia, A. De Herde, Greenhouse effect in double-skin facade, *Energy Build*, 39(2), pp. 199-211, 2007.
- [13] N. Hashemi, R. Fayaz, M. Sarshar, Thermal behavior of a ventilated double skin facade in hot arid climate, *Energy Build*, 42(10), pp. 1823-32, 2010.
- [14] W. Choi, J. Joe, Y. Kwak, J. H. Huh, Operation and control strategies for multi-storey double skin facades during the heating season, *Energy and Buildings*, 49, 2012.

نمای تیشه‌ای یا چکشی	۱۸۴.۰	۲۱۹.۰	۵۴۶.۰	۳
نمای طبیعی یا مصنوعی گیاهی یا سبز	۱۸۱.۰	۲۱۴.۰	۵۳۹.۰	۴

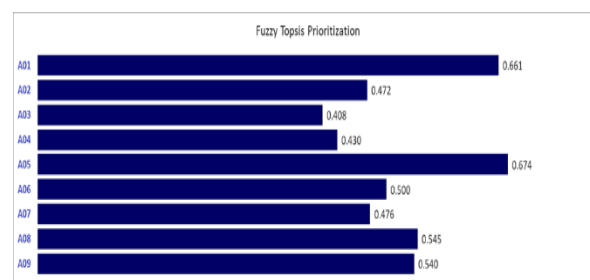


Fig. 10 Final priority of options

شکل ۱۰ اولویت نهایی گزینه‌ها

۷- نتیجه‌گیری و بحث

در رتبه‌بندی معیارها و زیرمعیارهای معرفی شده در این پژوهش، جایگاه اول متعلق به نمای داخلی ساختمان است. در جایگاه دوم و سوم، به ترتیب هزینه‌ها و مدت زمان اجرا قرار دارد. شایان ذکر است که شرایط اقلیمی در عوامل مؤثر قرار نگرفته است، زیرا از موارد آشکار مهندسی به‌شمار می‌رود. برای مثال، استفاده از رومی‌ها با تخلخل زیاد در مناطق سرد و مرطوب، به ذهن هر فردی می‌رسد که استفاده از آن خالی از اشکال نیست. بنابراین، از عوامل مؤثر حذف گردید و عوامل در نظر گرفته‌شده بعد از در نظر گرفتن شرایط اقلیمی مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند.

در رتبه‌بندی زیرمعیارهای زیست‌محیطی، زیرمعیار حفظ انرژی داخلی ساختمان در جایگاه اول قرار دارد. سپس، زیرمعیارهای عایق حرارتی و تأثیرپذیری از شرایط اقلیمی به ترتیب در جایگاه دوم و سوم قرار دارد. در ارزش‌گذاری جایگاه زیرمعیارهای هزینه‌ها، زیرمعیار هزینه‌های دسترسی به مصالح تشکیل‌دهنده نما در جایگاه اول قرار دارد. سپس، زیرمعیارهای هزینه نصب و نیروی انسانی در جایگاه دوم و هزینه‌های تعمیرات و نگهداری در آخرین جایگاه به لحاظ اهمیت قرار دارد.

در ارزش‌گذاری جایگاه زیرمعیارهای فرسایش و دوام، زیرمعیار کیفیت مصالح در جایگاه اول قرار دارد. سپس، زیرمعیارهای روش ساخت و مقاومت مصالح در برابر عوامل محیطی به ترتیب در جایگاه دوم و سوم قرار دارد.

در ارزش‌گذاری جایگاه زیرمعیارهای مدت زمان اجرا، زیرمعیار مدت زمان اجرا، دسترسی به مصالح تشکیل‌دهنده نما در جایگاه اول قرار دارد. سپس، زیرمعیارهای مدت زمان اجرا، تعویض و تعمیر و مدت زمان اجرا، ساخت به ترتیب در جایگاه دوم و سوم قرار دارد.

در ارزش‌گذاری جایگاه زیرمعیارهای نیروی انسانی، زیرمعیار وابستگی به وجود افراد با مهارت و تجربه، و با تجربه در جایگاه اول قرار دارد.

در ارزش‌گذاری جایگاه زیرمعیارهای دسترسی به مصالح تشکیل‌دهنده نما، زیرمعیار وجود مواد اولیه در داخل کشور در جایگاه اول قرار دارد. سپس، زیرمعیارهای فقدان منابع تأمین خارجی و دسترسی به ابزارهای ساخت، به ترتیب در جایگاه دوم و سوم قرار دارد.

در ارزش‌گذاری جایگاه زیرمعیارهای زیبایی منظر و جذب مخاطب، زیرمعیار تنوع رنگ و ظاهر نما در جایگاه اول قرار دارد. در ارزش‌گذاری

- [15] J. Darkwa, Y. Li, D. H. C. Chow, Heat transfer and air movement behaviour in a double-skin facade, *Sustainable Cities and Society*, 10 (0), pp. 130-139, 2014.
- [16] M. Haggag, Integrating Intelligent Glass Facades into Sustainable Buildings, *Proceeding of the 2nd International Conference on Energy and Sustainability*, Bologna, Italy, 2009.
- [17] Oesterle, et. al, *Double-Skin Facades*, Prestel Verlag, London, 2001.



تحلیل رفتار سازه‌ای سیستم مهاربند فولادی همگرای y شکل

سهیل مجیدزمانی*

استادیار، عضو هیأت علمی مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، تهران، ایران

* تهران، صندوق پستی ۱۶۹۶-۱۳۱۴۵، majidzamani@bhrc.ac.ir

چکیده

سیستم‌های باربر جانبی مبتنی بر کاربرد مهاربندهای همگرا از رایج‌ترین انواع این سیستم‌ها محسوب می‌شوند. در میان انواع مهاربندی‌های همگرا برخی فرم‌ها مانند X و V شناخته شده‌تر و برخی مانند y کمتر رایج هستند. این در حالی است که مهاربند y شکل در چشمه‌هایی از قاب که دارای بازشو هستند، یک راه حل قابل استفاده است. کمبود اطلاعات مستند علمی و فنی در مورد مهاربند y شکل موجب کاربرد نادرست آن و بروز خسارات تحت اثر زلزله می‌گردد. در این تحقیق، با انجام دادن مطالعات نظری و ویژگی‌های رفتاری این مهاربند مورد بررسی قرار گرفته و نشان داده شده است که مهاربند y شکل در نوع متعارف آن کاملاً مستعد کمانش خارج از صفحه است. با تحلیل کمانش در داخل و خارج از صفحه مهاربندی، ضریب طول بحرانی کمانش به دست آمده و به ازای قرارگیری نقطه همگرایی در نقاط مختلف دهانه ارایه شده است. برای برآورده ساختن ضوابط استاندارد ۲۸۰۰ ایران مبنی بر عدم تحمل کل نیروی جانبی فقط به وسیله فشار یا کشش در اعضای مهاربندی، لازم است که مکان نقطه همگرایی برای مهاربند y شکل رعایت گردد. در انتها به کمک روش ضرایب تغییرمکان، سطح عملکرد لرزه‌ای قاب مهاربندی شده برآورد شده و مشخص گردیده است که این سیستم مهاربندی توانایی تأمین سطح عملکرد ایمنی جانی را در زلزله طرح دارد.

کلیدواژگان

مهاربندی، قاب فولادی، مهاربندی همگرا، مهاربندی y شکل

An Analysis on the Structural Behavior of the y-Shaped Concentric Steel Bracing

Sohail Majid Zamani*

Structural Engineering Department, Road, Housing and Urban Development Research Center, Tehran, Iran

* P.O. Box 13145-1696, Tehran, Iran, majidzamani@bhrc.ac.ir

Abstract

Lateral bearing systems utilizing concentric braces are considered to be the most common types of these systems. Among the types of concentric braces, some forms such as X and V are better known and some are less common such as y-shaped. Meanwhile, the y-shaped brace is a usable solution in frame spans that have openings. The lack of documented scientific and technical information about the y-shaped brace causes its incorrect use and the occurrence of damages under the effect of earthquakes. In this research, the behavioral characteristics of this brace have been investigated by conducting theoretical studies. It has been shown that the y-brace in its conventional form is quite susceptible to out-of-plane buckling. By analyzing the in-plane and out of plane buckling of bracing, the critical buckling length coefficient has been obtained and it is presented for the location of the convergence point in different locations of the span. In order to satisfy the requirements of Iran Standard 2800 which prohibits carrying the total lateral force only by compression or tension in the bracing members, it is necessary to observe the location of convergence point for the y-shaped bracing. Finally, with the help of displacement coefficients method, the level of seismic performance of the y-braced frame was estimated and it was determined that this bracing system has the ability to provide the life safety performance in design earthquake.

Keywords

Bracing, Steel Frame, Concentric Bracing, y-Shaped Bracing

۱- مقدمه

فولادی، مزایای مهاربندی y شکل را در تأمین بازشوی در و پنجره در مقایسه با سایر مهاربندی‌های همگرا نشان می‌دهند.

مهاربندی همگرای y شکل در صنعت ساختمانی ایران به نام‌های مهاربندی "دروازه‌ای" یا "پرده‌ای" یا "خیمه‌ای" نیز شناخته می‌شود. این مهاربندی به‌طور شماتیک در شکل ۱ نشان داده شده است. مهم‌ترین ویژگی این مهاربندی، کششی یا فشاری شدن همزمان هر سه مهاربند در یک دهانه قاب است. زونتاگ، هین و هارت در کتاب خود در باب طرح و اجرای سازه‌های

در موضوع اول با فرض یک چشمه از قاب مهاربندی شده با مهاربندهای دروازه‌ای متقارن و فرض اتصالات کاملاً مفصلی، تغییرات سختی جانبی قاب به ازای تغییرات محل همگرایی اعضای مهاربندی بررسی شده است. همچنین، تأثیر نسبت ارتفاع قاب به طول دهانه بر سختی جانبی قاب نیز مورد بحث قرار گرفته است. بر اساس بررسی پارامترهای سختی جانبی قاب دروازه‌ای، محل مناسب نقطه همگرایی سه عضو مهاربندی به‌دست آمده است.

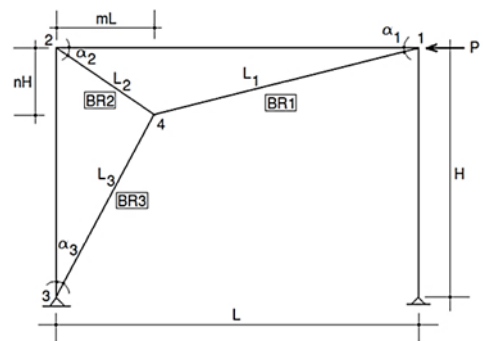
در بحث پایداری ارتجاعی قاب با مهاربند دروازه‌ای، اتصالات اعضای قاب و مهاربندها در داخل صفحه قاب، مفصلی فرض شده است. در جهت خارج از صفحه، فقط اتصال اعضای مهاربندی به یکدیگر در نقطه همگرایی از نوع لنگرگیر فرض شده است. به ازای تغییرات محل نقطه همگرایی اعضای مهاربندی، تغییرات ممان اینرسی اعضای مهاربندی و تغییرات نسبت ارتفاع قاب به طول دهانه، تغییرات نیروی کماتش قاب بررسی شده است. در نتیجه این بررسی، موقعیت نقطه همگرایی برای حصول حداکثر نیروی کماتش به‌دست آمده است. همچنین، ضریب طول کماتش خارج از صفحه به ازای تغییرات نقطه همگرایی محاسبه شده است.

صفاری و یزدی امکان کماتش خارج از صفحه مهاربند Y شکل را با استفاده از روابط شیب و افت بررسی کرده‌اند [5]. در مقاله ایشان رفتار قاب و مصالح الاستیک فرض شده است و با فرض عملکرد خرابی اعضای مهاربندی، نیروی داخلی اعضا به صورت پارامتریک محاسبه شده است. سپس، با در نظر گرفتن عملکرد سه‌بعدی قاب و با استفاده از روابط شیب و افت و اعمال شرایط سازگاری و معادلات تعادل، معادله مشخصه حاکم بر کماتش سیستم به‌دست آمده است و نمودارهایی جهت تعیین بار کماتش سیستم و ضریب طول مؤثر اعضا ارائه شده است.

کاظمی و عرفانی نیز در مقاله‌ای رفتار الاستیک مهاربند Y شکل را مورد بررسی قرار داده‌اند [6]. در این مقاله، پس از ارزیابی مختصر محاسن و معایب این نوع مهاربند با بررسی‌هایی نشان داده شده است که با حرکت کردن گره میانی به سمت گوشه قاب و افزایش خروج از مرکزیت این نقطه، سختی قاب کمتر خواهد شد و به تبع آن، پیوند ارتعاش طبیعی سازه افزایش می‌یابد، که در پی آن جابه‌جایی سیستم تحت بار ثابت افزایش می‌یابد.

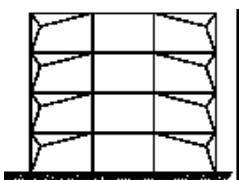
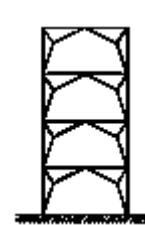
در مراجع فوق به کمک تحلیل ارتجاعی سازه‌های خرابا و قاب به بررسی خواص مهاربند Y شکل پرداخته شده است و مطلبی مبنی بر مطالعات دقیق‌تر شامل مدل‌سازی اجزای محدود غیرخطی و یا آزمایش‌های تجربی بر روی این مهاربند ارائه نشده است. همچنین، به کماتش غیرخطی خارج از صفحه و بار معادل آن پرداخته نشده است. ولی از نتایج مطالعات در مجموع چنین بر می‌آید که در نظر گرفتن رفتار الاستیک برای مهاربندی صحیح نیست، زیرا بار کماتش محاسبه شده حدوداً برابر با بار تسلیم اعضای مهاربندی است. در بیشتر موارد، استفاده از مهاربند به صورت جفت متقارن توصیه شده است. دلیل این امر عدم تقارن رفتار مهاربندی در کشش و فشار است.

در پروژه "مقایسه نظری و تجربی رفتار فرم‌های مختلف مهاربندی همگرا" که طی سال‌های ۱۳۸۲ تا ۱۳۸۴ در مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن انجام شد، مجموعه‌ای از ده مدل قاب یک دهانه و یک طبقه دارای مهاربندی Y شکل با مقیاس واقعی مورد بررسی آزمایشگاهی و تحلیل‌های عددی اجزای محدود قرار گرفت [7].



شکل ۱ مهاربندی Y شکل

جدول ۱ ضریب رفتار q، برای مهاربندی‌های همگرا در Eurocode 8

Ductility Class		
Frame with concentric bracings	H	M
Diagonal bracings		
	4	4
V-bracings		
	2.5	2

فخریاسری و پوروشسب در تشریح سازه‌های صنعتی فولادی، مهاربند Y شکل را به نام مهاربند پرده‌ای معرفی و بیان می‌کنند که این مهاربند در فشار کارایی ندارد و لازم است به صورت یک جفت متقارن در کنار یکدیگر و در هر جهت پلان سازه استفاده شود [2]. مهاربند پرده‌ای در آیین نامه Eurocode 8 جزء مهاربندهای همگرا محسوب شده است [3]. در جدول ۱ که برگرفته از این آیین‌نامه است، استفاده از مهاربندی Y شکل به صورت تک و جفت متقارن در یک دهانه قاب نشان داده شده است و ضریب رفتار آن، q، ارائه شده است.

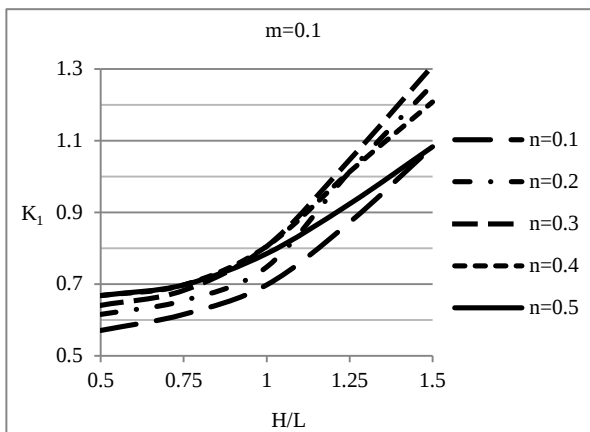
پایان‌نامه کارشناسی ارشد موسی موسی‌پور در دانشگاه صنعتی شریف به طور نظری به سه میحث زیر پرداخته است [4]:

۱. رفتار الاستیک خطی قاب‌های ساده با مهاربندی دروازه‌ای
۲. پایداری قاب‌های ساده با مهاربندی دروازه‌ای
۳. عملکرد غیرخطی مهاربندهای دروازه‌ای و شکل‌پذیری آنها

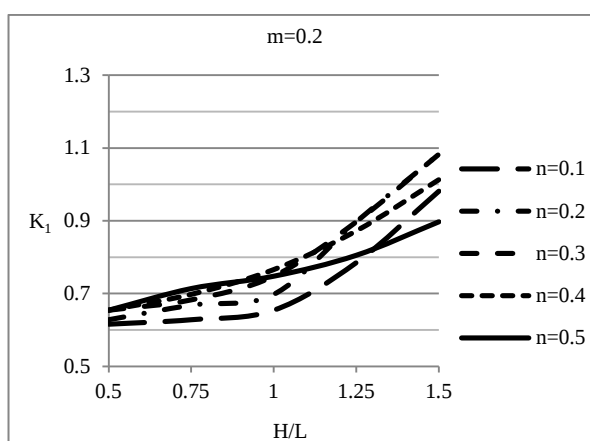
۲- محاسبه بار کمانش مهاربندی Y-شکل

برای طراحی مهاربندها در فشار لازم است که بار کمانش آنها محاسبه شود. بر اساس متون فنی و مطابق با رویه آیین‌نامه‌های طراحی سازه‌ای، بار کمانش تابع طول مؤثر عضو فشاری است.

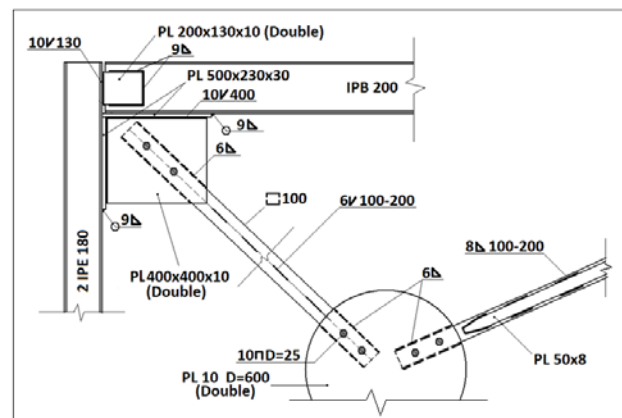
برای محاسبه ضریب طول مؤثر کمانش مهاربندی Y شکل، دو حالت کمانش در داخل صفحه قاب و کمانش خارج از صفحه قاب قابل تشخیص است. در شکل ۱ هندسه عمومی مهاربندی Y شکل دیده می‌شود. در مهاربندی Y شکل هر سه مهاربند به‌طور هم‌زمان در فشار قرار می‌گیرند و نمی‌توان مشابه مهاربند ضربدری از اثر مثبت مهاربند کششی در جلوگیری از کمانش مهاربند فشاری بهره برد. بنابراین، در صورت کاربرد ورق‌های اتصال تکی، وقوع کمانش خارج از صفحه با توجه به انعطاف‌پذیری خمشی ورق در مقایسه با صلبیت آن در صفحه قاب، حتمی است. در صورت کاربرد اتصالات گیردار در انتهای مهاربندها، امکان وقوع کمانش داخل و یا خارج از صفحه قاب با توجه به نسبت لاغری مهاربندها وجود دارد.



شکل ۳ ضریب طول مؤثر K_1 برای مهاربند BR1 در کمانش خارج از صفحه
($m = 0.1$)



شکل ۴ ضریب طول مؤثر K_1 برای مهاربند BR1 در کمانش خارج از صفحه
($m = 0.2$)



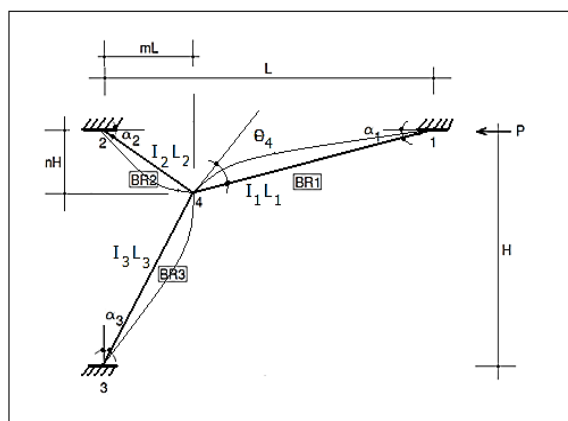
شکل ۲ جزئیات اتصال مهاربندی Y شکل

در این بررسی، از ورق‌های اتصال دوتایی برای تأمین گیرداری در انتهای مهاربندها استفاده می‌شود تا امکان پدید آمدن کمانش غیرارتجاعی در صفحه قاب و مطالعه ویژگی‌های آن فراهم شود (شکل ۲). از طرف دیگر، در صورت وقوع کمانش خارج از صفحه، حضور اتصالات گیردار باعث افزایش لنگر خمشی در دو انتهای مهاربند علاوه بر وسط دهانه آن می‌شود. این روند در نهایت موجب شکل‌گیری حداقل دو و حداکثر سه مفصل خمیری در مهاربند می‌شود. در حالی که با اتصالات تک‌ورقی، حداکثر یک مفصل خمیری عمده در مهاربند و دو مفصل خمیری فرعی در ورق‌های اتصال پدید می‌آیند. به این ترتیب، کاربرد ورق‌های اتصال دوتایی می‌تواند از نظر استهلاک انرژی نسبت به کاربرد ورق تکی، برتری داشته باشد.

۲-۱- ضریب طول بحرانی کمانش برون صفحه‌ای مهاربندی Y-شکل

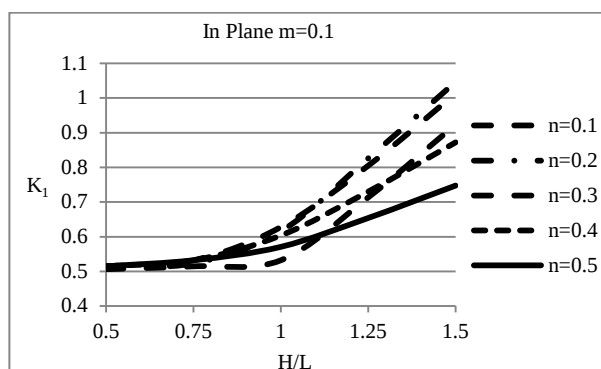
فرض می‌شود که مهاربندها عمدتاً تحت تأثیر نیروها و تغییرشکل‌های محوری قرار دارند. مفاصل بین مهاربندها توانایی انتقال لنگر خمشی را ندارند و قاب مهاربندی شده عملاً مشابه یک خرپا رفتار می‌کند. توزیع نیروهای محوری در این خرپا بر اساس هندسه اولیه قاب صورت می‌گیرد. طول مهاربندها و بزرگی نیروهای محوری از ویژگی‌های پایه‌ای قاب مهاربندی شده

مهاربندها در حدود یک دهم ممان اینرسی سطح مقطع تیرها و ستون‌ها فرض می‌شود. به این ترتیب، مهاربندها عملاً توانایی ایجاد چرخش در گره‌های قاب یعنی محل اتصال تیر و ستون و مهاربند را ندارند و این گره‌ها در تحلیل فاقد چرخش فرض می‌شوند. تنها گره‌ای که آزادی چرخش دارد، نقطه همگرایی مهاربندهاست. به این ترتیب فرض می‌شود که اعضای مهاربندی Y شکل به صورت تیر-ستون‌هایی با یک انتهای گیردار در گوشه قاب، عمل می‌کنند. با این فرضیات ساده‌کننده، تغییرشکل قاب بر اثر چرخش نقطه همگرایی که شکل مد کمانش محتمل را نشان می‌دهد، در شکل ۸ دیده می‌شود.

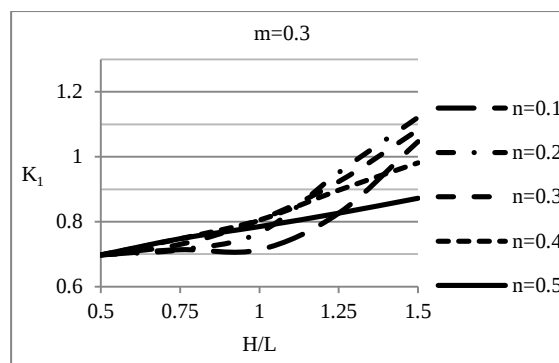


شکل ۸ مد کمانش قاب مهاربندی شده در داخل صفحه قاب

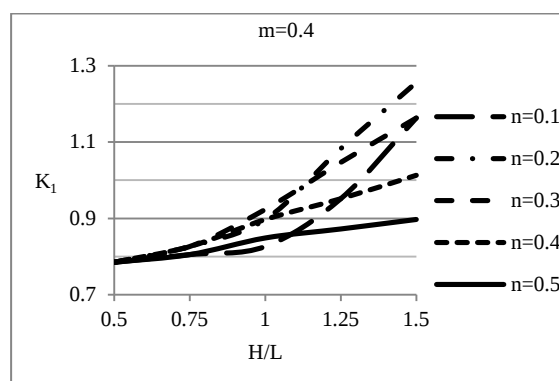
برای بررسی تغییرات ضریب طول مؤثر در محدوده کاربردی مهاربندی Y شکل، نسبت ارتفاع به دهانه قاب، H/L ، بین 0.5 تا 1.5 و هر یک از ضرایب m و n بین 0.1 تا 0.5 تغییر داده شدند و ضرایب طول مؤثر محاسبه گردیدند. در این محاسبات، ممان اینرسی مقطع مهاربندها یکسان فرض شده است. شکل‌های ۹ تا ۱۳ تغییرات ضریب طول مؤثر K_1 را نشان می‌دهند.



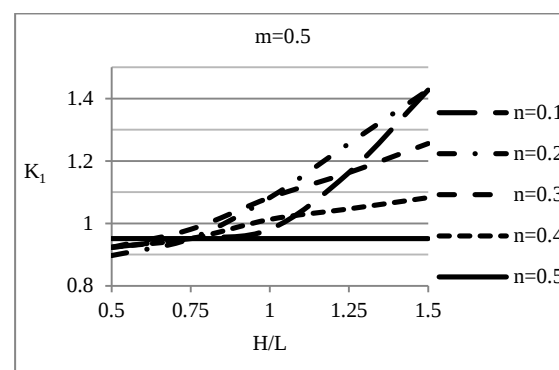
شکل ۹ ضریب طول مؤثر K_1 برای مهاربند BR1 ($m=0.1$) در کمانش درون صفحه



شکل ۵ ضریب طول مؤثر K_1 برای مهاربند BR1 در کمانش خارج از صفحه ($m=0.3$)



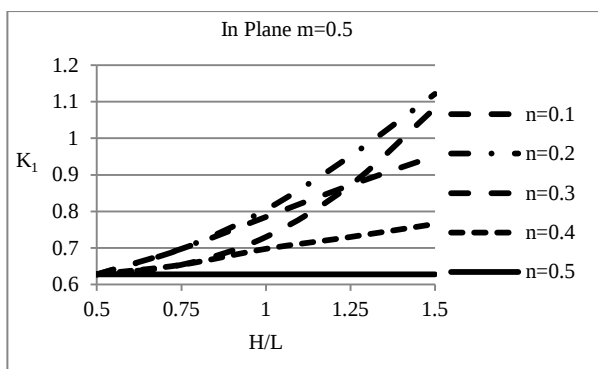
شکل ۶ ضریب طول مؤثر K_1 برای مهاربند BR1 در کمانش خارج از صفحه ($m=0.4$)



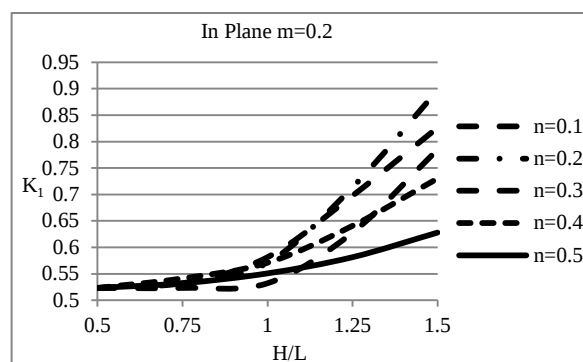
شکل ۷ ضریب طول مؤثر K_1 برای مهاربند BR1 در کمانش خارج از صفحه ($m=0.5$)

۲-۲- ضریب طول بحرانی کمانش درون صفحه‌ای مهاربندی Y شکل

فرض می‌شود که قاب مهاربندی شده مشابه یک خرپای مسطح معین رفتار می‌کند و مهاربندها عمدتاً تحت تأثیر نیروهای محوری قرار دارند. توزیع نیروهای محوری در این خرپا بر اساس هندسه اولیه قاب صورت می‌گیرد. طول مهاربندها و بزرگی نیروهای محوری از ویژگی‌های پایه‌ای قاب مهاربندی شده یعنی طول دهانه، ارتفاع قاب و موقعیت نقطه همگرایی که با متغیرهای m و n در شکل ۲ نشان داده شده‌اند، قابل محاسبه است. تغییرشکل اعضای قاب فقط درون صفحه قاب امکان‌پذیر است. ممان اینرسی سطح مقطع



شکل ۱۳ ضریب طول مؤثر K_1 برای مهاربند BR1 ($m = 0.5$) در کمناش درون صفحه

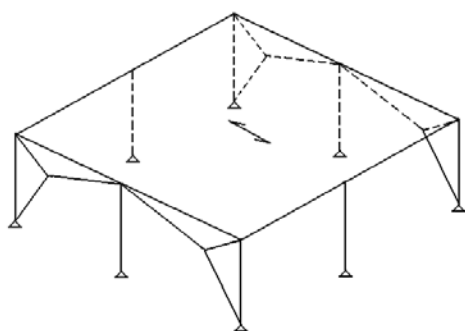


شکل ۱۰ ضریب طول مؤثر K_1 برای مهاربند BR1 ($m = 0.2$) در کمناش درون صفحه

۲-۳- مد کمناش برون صفحه‌ای مهاربند صلب - ورق نرم
در نمونه‌های مهاربندی Y شکل دارای اتصال تک ورق، مهاربندها فقط نیروی محوری فشاری ارتجاعی را تحمل می‌کنند و خمش غیرارتجاعی در ورق‌های اتصال متمرکز می‌گردد. این نحوه عملکرد استفاده از ضرایب طول کمناش پیش‌گفته را غیرممکن می‌سازد. در این حالت، هر چند که محاسبه نیروی فشاری مهاربندها در لحظه کمناش با تحلیل ویژه‌ای امکان‌پذیر است، اما توصیه می‌شود که برای سهولت محاسبات و تأمین ضریب ایمنی بزرگتر، فقط از مقاومت کششی مهاربندها استفاده شود.

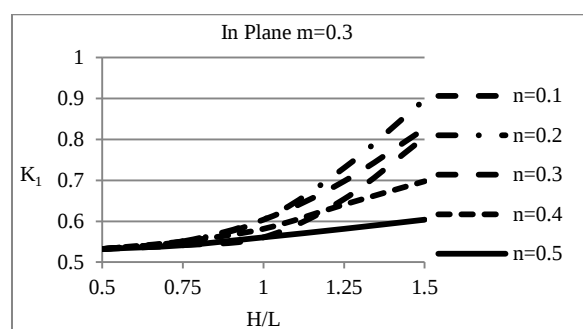
۲- بررسی عملکرد لرزه‌ای

به منظور بررسی توان باربری لرزه‌ای مهاربند همگرای Y شکل، از روش "تعیین نقطه عملکرد با استفاده از ضرایب" براساس مندرجات آیین‌نامه FEMA356 استفاده می‌کنیم [8]. در این بررسی، یک ساختمان یک طبقه با اهمیت متوسط با پلان تقریباً مربع شکل دارای مهاربندی در امتداد دو محور در یک جهت پلان مانند شکل ۱۴ در نظر گرفته شده است.

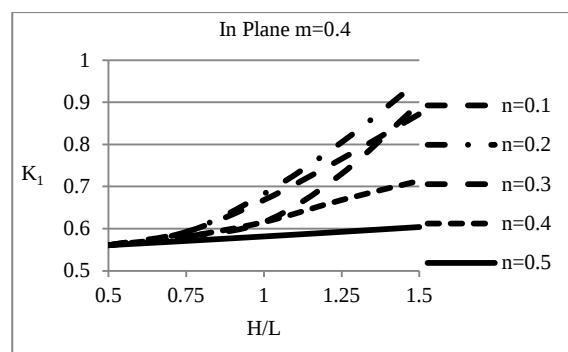


شکل ۱۴ نمای سه بعدی ساختمان مورد مطالعه با مهاربند Y شکل

همین ساختمان با مهاربندهای X به عنوان مبنای مقایسه مورد بررسی قرار گرفته است. نمای ساختمان با مهاربند ضربدری در شکل ۱۵ نشان داده شده است.



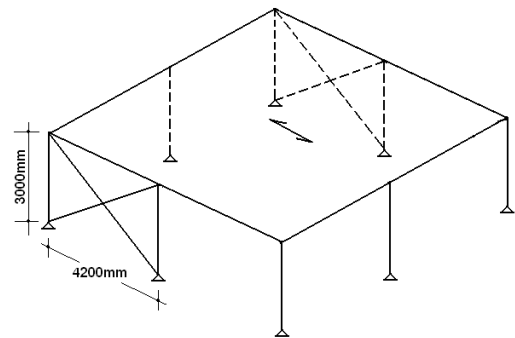
شکل ۱۱ ضریب طول مؤثر K_1 برای مهاربند BR1 ($m = 0.3$) در کمناش درون صفحه



شکل ۱۲ ضریب طول مؤثر K_1 برای مهاربند BR1 ($m = 0.4$) در کمناش درون صفحه

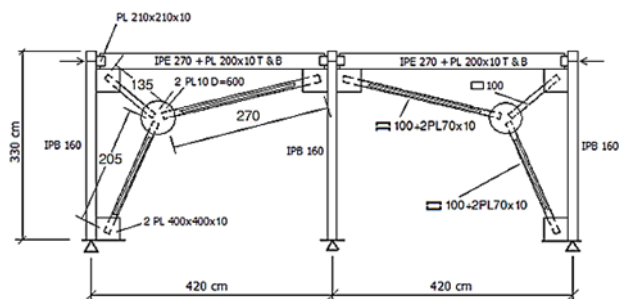
جدول ۲ مقاومت و سختی قاب مهاربندی شده

مهاربندی	دو دهانه مهاربندی				
	یک دهانه مهاربندی		مقارن		
	K_e (kN/m)	V_D^+ (kN)	V_D^-	K_e	$2 V_D^-$
y	16745	339	249	33490	498
X	90650	801	576	-----	-----



شکل ۱۵ نمای سه بعدی ساختمان مورد مطالعه با مهاربند X

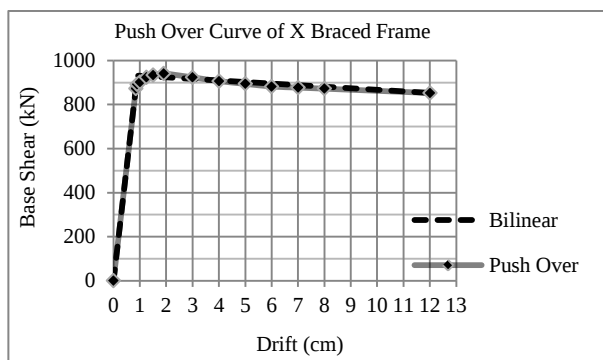
مهاربندی Y شکل نیز برای تحمل همین وزن طراحی می‌شود. مقطع مهاربندها برای حصول کماتش داخل صفحه قاب دارای فرم II متشکل از دو ناودانی U100 هستند و اتصال این مهاربندها به قاب به وسیله ورق‌های اتصال دوتایی فرض شده است. فاصله نقطه همگرایی از گوشه قاب برای حصول مقاومت مورد نیاز، تنظیم شده است (شکل ۱۶).



شکل ۱۶ هندسه قاب ساده با مهاربندی Y شکل

مقطع مهاربندهای X به طور دلخواه در نظر گرفته شده و دارای فرم I متشکل از دو ناودانی U100 است. اتصال این مهاربندها به قاب به وسیله ورق‌های اتصال تکی فرض شده است. اتصالات تیر و ستون از نوع ساده هستند و یک قاب ساختمانی ساده را شکل می‌دهند. مقاومت جانبی مهاربندی با فرض وجود نیروی محوری مساوی با مقاومت مهاربند فشاری در همه مهاربندها محاسبه می‌شود. با فرض استقرار ساختمان در منطقه‌ای با خطر زلزله خیلی زیاد روی زمین نوع II و ضریب شتاب مبنای طرح برابر 0.35 ، وزن قابل تحمل به وسیله سیستم مهاربندی ضربدری برابر با 540 تن برآورد می‌شود.

به این ترتیب، هر دو مهاربندی بر اساس تحلیل‌های اولیه برای تحمل وزن مؤثر یکسان طراحی شده‌اند، هرچند مصرف مصالح در مهاربندی Y شکل 14% بیش از وزن مصالح در مهاربندی X است. این تحلیل‌ها خطی و ارتجاعی هستند و رفتار غیرخطی و غیرارتجاعی مهاربندها را نشان نمی‌دهند. برای بررسی این اثرها در پاسخ سازه، تحلیل غیرارتجاعی تحت بار افزون در نظر گرفتن تغییرشکل‌های بزرگ روی مدل قاب انجام شده است. منحنی دو خطی بار - تغییرمکان ناشی از تحلیل فوق در شکل‌های ۱۷ و ۱۸ نشان داده شده است.



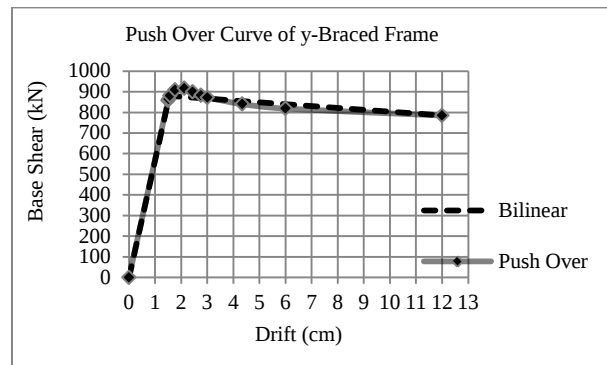
شکل ۱۷ منحنی بار-تغییرمکان قاب با مهاربندی X تحت بار افزون

برای تشخیص بروز کماتش داخل یا خارج از صفحه قاب، مقادیر لاغری همه مهاربندها در هر دو جهت اصلی مقطع آنها محاسبه شده است. بر این اساس، لاغری مهاربند بلند در کماتش داخل صفحه قاب برابر با 80 به دست آمده است که بیشترین مقدار در میان همه مهاربندها در هر دو جهت اصلی است. بنابراین، کماتش داخل صفحه در مهاربند بلند تعیین‌کننده مقاومت جانبی قاب مهاربندی شده است.

مقاومت فشاری مهاربندها با فرض کماتش داخل صفحه و ضریب طول مؤثر 0.65 برای آنها محاسبه شده است. مقاومت جانبی مهاربند Y شکل دو دهانه مساوی دو برابر مقاومت دهانه فشاری در نظر گرفته شده است. همچنین، سختی ارتجاعی نیز با در نظر گرفتن هندسه قاب و مشخصات مقاطع محاسبه شده است که در جدول ۲ ارایه می‌شود.

جدول ۳ شکل‌پذیری مهاربند ضربدری X

مجاز (PD)	Plastic Ductility (PD)	ΔL_T یا ΔL_C	Δ_T یا Δ_C	δ_t	رده عملکرد	مهاربند X
7	4.3	2.6	0.76	3.2	LS	مهاربند
9	7.8	4.2	0.76	5.3	CP	کششی
4	3.9	2.6	0.61	3.2	LS	مهاربند
6	7.7	4.2	0.61	5.3	CP	فشاری



شکل ۱۸ منحنی بار- تغییرمکان قاب با مهاربندی Y تحت بار افزون

مطابق جدول ۳، مهاربندهای X شرایط شکل‌پذیری پلاستیک در سطح عملکرد ایمنی جانی (LS) را برآورده می‌نمایند.

در روش ضرایب تغییرمکان از رابطه عمومی زیر برای برآورد تغییرمکان جانبی هدف سازه استفاده می‌شود (فرمول ۱):

$$(1)$$

$$\delta_t = C_0 * C_1 * C_2 * C_3 * S_a * (T^2 / 4\pi^2) g$$

که در آن:

C_0 : ضریب اصلاح برآورد تغییرمکان سازه چند درجه از سازه یک درجه معادل

C_1 : ضریب اصلاح برآورد تغییرمکان غیرخطی از تحلیل سازه خطی

C_2 : ضریب اصلاح برای تأثیر افت سختی و مقاومت در چرخه‌های بارگذاری

C_3 : ضریب اصلاح برای تأثیر $P-\Delta$

با در اختیار داشتن مقادیر جرم، سختی و منحنی بار- تغییرمکان هر دو نوع مهاربندی مورد بحث، روش تعیین تغییرمکان هدف قابل انجام دادن است.

مهاربندی X:

$$T=0.35 \text{ sec}$$

$$R=2.57$$

$$C_0=1$$

$$C_1=1.26 \text{ Life Safety}$$

$$C_1=1.32 \text{ Collapse Prevention}$$

$$C_2=1.1 \text{ Life Safety}$$

$$C_2=1.2 \text{ Collapse Prevention}$$

$$C_3=1.1$$

$$(LS) \quad \delta_t = 1 * 1.26 * 1.1 * 1.1 * 0.875 * (0.35^2 / 4\pi^2) g = 4.1 \text{ cm}$$

$$(CP) \quad \delta_t = 1 * 1.32 * 1.2 * 1.1 * 1.5 * 0.875 * (0.35^2 / 4\pi^2) g = 7.0 \text{ cm}$$

جدول ۴ شکل‌پذیری مهاربند Y شکل

مجاز (PD)	Plastic Ductility (PD)	ΔL_T یا ΔL_C	Δ_T یا Δ_C	δ_t	رده عملکرد	مهاربند Y
7	3.85	2.0	0.52	5.25	LS	مهاربند بلند
9	6.5	3.4	0.52	8.75	CP	کششی
5	4.6	2.3	0.41	5.25	LS	مهاربند بلند
7	8.0	3.675	0.41	8.75	CP	فشاری

مهاربندهای متوسط و کوتاه در مهاربندی Y شکل مورد بحث، بحرانی نیستند. مهاربند بلند مطابق جدول فوق شرایط شکل‌پذیری پلاستیک را در سطح عملکرد ایمنی جانی (LS) ارضا نموده است.

هر دو نوع مهاربندی X و Y به نحو مشابهی شرایط عملکرد لرزه‌ای را برآورده می‌نمایند. این امر نشان‌دهنده کفایت روش طراحی قاب‌های مهاربندی‌شده و نیز توانایی این سیستم‌های مهاربندی برای تحمل تغییرشکل‌های لرزه‌ای در سطح عملکرد ایمنی جانی است.

۴- بحث و نتیجه‌گیری

در این مقاله سیستم مهاربند فولادی Y شکل در قاب‌های یک طبقه به صورت تحلیلی مطالعه و با مهاربند ضربردی مقایسه شد. هر دو نمونه سیستم مهاربندی مورد مطالعه تحت بارگذاری جانبی افزایشده قرار گرفتند و نمودار بار - تغییرمکان آنها استخراج شد. مشاهدات و نتیجه‌گیری‌های مربوط به رفتار سازه‌ای به قرار زیر است:

- مهاربند همگرای Y شکل باید به صورت متقارن یعنی شامل تعداد مساوی از دهانه‌های فشاری و کششی در هر قاب به کار رود. در صورت طراحی مهاربندهای هر دهانه قاب به طور متقارن، این شرط همواره برقرار خواهد بود.
- در مهاربند Y شکل با جزییات رایج در صنعت ساختمانی ایران، شامل: مقاطع ناودانی دوتایی فاصله‌دار و اتصالات تک ورقی، مهاربندهای فشاری دارای نیروی محوری قابل توجهی نیستند و عملاً مهاربندهای کششی تحمل بار جانبی را به عهده دارند. توصیه می‌شود در مهاربندی Y شکل با این جزییات، فقط مقاومت مهاربندهای کششی در محاسبه مقاومت جانبی در نظر گرفته شود.
- مقاومت فشاری مهاربند Y شکل با اتصالات گیردار باید بر اساس روش محاسبه مقاومت عناصر فشاری در مبحث دهم مقررات ملی ساختمان به دست آید. برای حالت اتصالات گیردار، ضرایب طول مؤثر کمانش در این مقاله ارائه شده است.
- استفاده از اتصالات گیردار در برابر خمش مهاربند در کمانش خارج از صفحه، باعث افزایش ظرفیت باربری جانبی، سختی ارتجاعی و استهلاک انرژی قاب مهاربندی شده می‌شود.
- نمونه‌های قاب یک طبقه با مهاربندی Y شکل مورد مطالعه در این تحقیق در صورت کاربرد به عنوان سیستم قاب ساده فولادی به علاوه مهاربندی همگرای معمولی مطابق با مبحث دهم مقررات ملی ساختمان [10]، دارای عملکرد قابل قبول در سطح ایمنی جانی در برابر زلزله طرح در مناطق با خطر زلزله خیلی زیاد بر روی خاک نوع II مطابق با استاندارد ۲۸۰۰ [9] هستند.

۵- مراجع

1. S. Sontag, W. Henn, F. Hart, *Multi Story Buildings in Steel*, 2nd Edition, Collins, London, 1985.
۲. س. فخریاسری، ر. پوروشسب، طرح و محاسبه سالن‌های صنعتی سبک و سنگین، انتشارات دهخدا، تهران، ۱۳۸۰.
3. Eurocode 8, Design of Structures for Earthquake Resistance, Part 3, BSI, London, 2004.
۴. م. موسی‌پور، بررسی عملکرد بادبندهای دروازه‌ای در برابر زلزله، پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد، دانشگاه صنعتی شریف، ۱۳۸۰.
۵. ح. صفاری، ح. ع. مسلمان یزدی، تعیین بار کمانش سیستم مهاربند دروازه‌ای، اولین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف، ۱۳۸۳.
۶. م. ت. کاظمی، س. عرفانی، طراحی بادبندهای دروازه‌ای برای زلزله، سومین همایش نقد و بررسی آیین نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله، ۱۳۸۱.
۷. مقایسه نظری و تجربی رفتار فرم‌های مختلف مهاربندی‌های همگرا، نشریه گ-۵۱۸، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، ۱۳۸۸.
8. FEMA 356, Prestandard and Commentary For the Seismic Rehabilitation of Buildings, Federal Emergency Management Agency, USA.

۹. استاندارد ۲۸۰۰ ایران، آیین‌نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی.
۱۰. مقررات ملی ساختمان ایران، مبحث دهم، طرح و اجرای ساختمان‌های فولادی، دفتر تدوین و ترویج مقررات ملی ساختمان.