




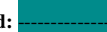
Seismic Hazard Assessment of Power Plant Structures Founded on Block-Type Deep Soil Mixing–Improved Ground Considering Soil–Structure Interaction

Ali Yaghfoori¹, Iradj Mahmoudzadeh Kani^{2*} , Hassan Yousefi³

1. PhD student of Earthquake Engineering, School of Civil Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

2. Corresponding Author, Professor, School of Civil Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran Email: imkani@ut.ac.ir ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0124-7868>

3. Assistant Professor, School of Civil Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

Article Info	ABSTRACT
<p>Article type: Research Article</p> <p>Article history: Received:  Revised:  Accepted:  Published: </p> <p>Keywords: seismic hazards, seismic behavior, nuclear power plant structures, deep soil mixing (DSM), structure–soil–structure interaction (SSSI), near-field earthquake, rocking motion, bidirectional loading</p>	<p>Earthquakes are among the most significant natural hazards that threaten the safety of critical and sensitive structures, such as nuclear power plants, and can disrupt energy production, leading to irreversible environmental and human consequences. International standards and IAEA guidelines emphasize that the seismic design of nuclear facilities must protect human life and the environment. For heavy, sensitive infrastructure, Deep Soil Mixing (DSM) is recommended to mitigate seismic hazards; this study evaluates its effectiveness in reducing seismic risk for an operational nuclear reactor. The APR1400 reactor was modeled on a multi-layered soil improved by DSM based on laboratory test results. The soil-structure interaction (SSI) and structure-soil-structure interaction (SSSI) were analyzed under unidirectional Ricker wave loading at various frequencies, as well as under unidirectional and bidirectional near-field earthquake records. The results indicated that horizontal acceleration was higher in the internal structure than in the containment building and decreased with increasing excitation frequency; DSM implementation beneath the foundation increased horizontal acceleration, with a more pronounced effect in the internal structure. Analysis of vertical acceleration revealed that the containment building, due to its location at the edge of the foundation, experienced higher vertical acceleration, and DSM-enhanced rocking motion further increased it. The effect of DSM on the internal structure was frequency-dependent. Bidirectional loading had a negligible impact on horizontal acceleration but significantly increased the Fourier amplitude and energy of vertical acceleration. Overall, SSSI reduced horizontal acceleration, but the presence of a second structure at 50 m locally reduced horizontal acceleration while increasing vertical acceleration. These findings highlight the importance of 3D modeling, application of near-field seismic records, and careful consideration of SSSI and inter-structure spacing for mitigating seismic hazards, protecting human life and the environment, and designing safe nuclear facilities with sensitive equipment and high-frequency content.</p>

How to Cite: Last Name, Initial., Last Name, Initial., & Last Name, Initial. (2021). Title of paper. *Journal of Natural Environmental Hazards*, -- (--), ----.



© The Author/Authors

DOI: 000000000000000000

Publisher: University of Sistan and Baluchestan

EXTENDED ABSTRACT

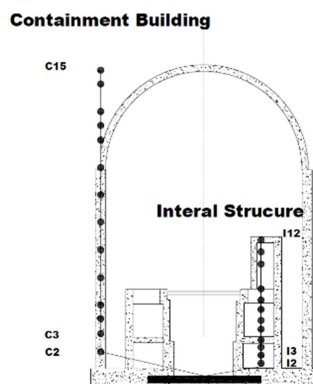
INTRODUCTION

The Fukushima Daiichi nuclear disaster on March 11, 2011, demonstrated that natural hazards such as earthquakes and tsunamis, if not adequately mitigated, can cause catastrophic, irreversible nuclear accidents. The event led to the failure of emergency cooling systems, the meltdown of three reactors, and the widespread release of radioactive materials, underscoring that insufficient understanding of the interactions among structures, foundations, and site geotechnical conditions can significantly amplify seismic damage (Hasegawa, 2012; Wada et al., 2013). Accurate seismic performance assessment of nuclear power plants, accounting for soil–structure interaction (SSI) and employing advanced ground improvement techniques, is vital for reducing vulnerability and managing risks for these critical infrastructures (Jeremić et al., 2009; Kanellopoulos et al., 2024; Yaghfoori et al., 2025a, 2025b). Heavy and sensitive structures, such as the APR1400 reactor, require not only detailed structural analysis but also seismic assessment of equipment foundations, as soil behavior is markedly different in the presence of such massive structures than under bare-soil conditions. Previous studies indicate that soil–structure interaction and structure–soil–structure interaction (SSSI) can substantially alter the seismic response of buildings, particularly in large and sensitive nuclear facilities. Key influencing factors include soil properties, foundation type, proximity and layout of adjacent structures, and the direction of seismic loading. Ground improvement using Deep Soil Mixing (DSM) has emerged as an effective technique to mitigate seismic hazards; research has shown that DSM can reduce horizontal accelerations acting on structures while influencing vertical accelerations associated with rocking motion. These findings emphasize the importance of accurate numerical modeling, careful assessment of SSI and SSSI, and the use of soil improvement techniques to ensure the seismic safety of nuclear power plants, protect human life and the environment, and minimize the consequences of natural hazards.

DATA AND METHODOLOGY

Geology and Soil Properties

Soil properties were obtained from laboratory tests and field investigations at an ongoing nuclear power plant project. Based on Figure 1a, core drilling was performed using a Mobil Drill XY rig, identifying 14 engineering–geological units (EGUs) composed of clay, silt, various sizes of sand, sandstone, and macadam, with depths exceeding 200 meters. Longitudinal wave velocities ranged from 400 to 2700 m/s, and shear wave velocities ranged from 156 to 900 m/s, generally increasing with depth. For numerical modeling, 11 soil layers from a 120-meter borehole beneath the main structure were selected.



(b)



(a)

Figure 1: (a) Mobil Drill XY coring rig, (b) Lumped Mass Model of the Nuclear Power Plant Structure

Deep Soil Mixing (DSM)

Six boreholes were drilled, and approximately 900 kg of soil samples were collected. Soil–cement tests were conducted with Type 2 and Type 5 cements at various water-to-cement ratios and curing times of 7–56 days. Type 5 cement with a total water-to-cement ratio of 1.7 showed the best performance. The DSM columns were designed with a diameter of 1.6 m and 20% overlap. The mechanical properties from laboratory tests were used in the finite element models, and the DSM block thickness was set to 8 m (Table 1).

Table 1: Properties of improved soil

Density t / m^3	$V_s (m / s)$	$V_p (m / s)$
2.3	1300	2400

Structural Properties and Modeling

The containment building and internal structure were modeled as beam–column systems with lumped masses (Figure 1b). Concrete properties of the foundation and structures were modeled with a foundation radius of 50 m and a thickness of 8 m. The 3D model was developed in GiD and analyzed in OpenSees. Soil behavior was represented by the Drucker–Prager model, and lateral and bottom boundaries were modeled using free-field soil columns and Lysmer–Kohlmayer dashpots. Loading scenarios included one-directional Ricker wave excitation and one- and two-directional near-field earthquake records. The effects of DSM and soil–structure–soil interaction (SSSI) on horizontal and vertical accelerations of the structures were evaluated.

CONCLUSION

The results of this study demonstrated that the seismic response of the APR1400 reactor structure is significantly influenced by deep soil mixing (DSM) improvements and structure–soil–structure interaction (SSSI). The increase in horizontal accelerations within the internal structure and the amplification of vertical accelerations due to rocking motion, particularly in the 2–10 Hz frequency range, indicate a concentration and redistribution of seismic energy within a range overlapping the operational frequencies of many sensitive equipment and safety systems. Such amplification can intensify stresses in connections, electromechanical equipment, cooling systems, and piping, thereby increasing the likelihood of functional failures, even when the primary structure remains within its elastic range. The two-directional loading analysis showed that although no significant change occurred in horizontal acceleration, the Fourier amplitude and energy of vertical acceleration increased markedly. Since many design codes account for vertical excitations with reduction factors, neglecting this amplification may lead to an underestimate of the actual seismic demand. This issue is particularly critical in nuclear structures, where safe operation relies heavily on the integrity of internal equipment and safety systems. Furthermore, it was observed that SSSI at specific distances, especially 50 meters, could locally amplify structural responses in critical frequency ranges. In multi-unit nuclear sites, this phenomenon may lead to energy transfer and amplified response in one unit due to the dynamic behavior of an adjacent unit, a factor often overlooked in conventional design approaches. Lessons from the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant incident following the 2011 Tohoku earthquake and tsunami highlight that inadequate evaluation of seismic performance and environmental interactions can lead to cascading safety system failures and extensive human and environmental consequences. The findings of this study emphasize that accurate modeling of soil–structure interaction, simultaneous application of horizontal and vertical components, and consideration of inter-structure spacing are not only analytical necessities but essential components of risk reduction strategies in nuclear power plants. Ignoring these factors may lead to non-conservative seismic demand estimates and reduced safety margins of critical systems.

این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می باشد. لطفا برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

ETHICAL CONSIDERATIONS

Conflict of Interest Statement: The authors declare no conflict of interest.

Ethical Statement: This article does not contain any studies with human participants or animals performed by any of the authors

REFERENCES

References [in English]

.....

آماده انتشار (بدون شماره مجله)

ارزیابی خطر لرزه‌ای پی‌های راکتور هسته‌ای بهسازی شده با روش اختلاط عمیق خاک با در نظر گرفتن اثرات اندرکنش سازه-خاک-سازه

علی یغفوری^۱، ایرج محمودزاده کنی^{۲*} ID، حسن یوسفی^۳

۱. دانشجوی دکتری زلزله، دانشکده مهندسی عمران، دانشکدگان فنی دانشگاه تهران، تهران، ایران
۲. استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشکدگان فنی دانشگاه تهران، تهران، ایران (نویسنده مسئول)
۳. استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشکدگان فنی دانشگاه تهران، تهران، ایران

ایمیل: imkani@ut.ac.ir ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0124-7868>

چکیده

اطلاعات مقاله

زلزله یکی از مهم‌ترین مخاطرات طبیعی است که ایمنی سازه‌های حیاتی و حساس مانند نیروگاه‌های هسته‌ای را تهدید می‌کند و می‌تواند علاوه بر اختلال در تولید انرژی، پیامدهای طبیعی و انسانی جبران‌ناپذیر ایجاد کند. استانداردهای بین‌المللی و راهنماهای IAEA تأکید دارند که طراحی لرزه‌ای نیروگاه‌ها باید از جان انسان‌ها و محیط‌زیست حفاظت کند. در پروژه‌های حساس و سنگین، استفاده از اختلاط عمیق بلوکی (DSM) به منظور کاهش مخاطرات لرزه‌ای توصیه می‌شود و در این پژوهش، اثرات این روش بهسازی خاک در کاهش مخاطرات لرزه‌ای یک سازه نیروگاهی در حال اجرا ارزیابی شد. سازه راکتور APR1400 بر روی خاک لایه‌ای اصلاح شده با DSM و براساس نتایج آزمایشگاهی مدل‌سازی شد. اثر اندرکنش سازه-خاک و اندرکنش سازه-خاک-سازه (SSSI) تحت بارگذاری یک‌جهته مویک ریکر با فرکانس‌های مختلف و بارگذاری یک و دوجته راکوردهای زلزله حوزه نزدیک گسل تحلیل شد. نتایج نشان داد که شتاب افقی در سازه داخلی بیشتر از ساختمان محفظه است و با افزایش فرکانس کاهش می‌یابد؛ اعمال DSM زیر فونداسیون موجب افزایش شتاب افقی شد و اثر آن در سازه داخلی محسوس‌تر بود. تحلیل شتاب قائم نشان داد که ساختمان محفظه به دلیل قرارگیری در لبه فونداسیون شتاب قائم بیشتری تجربه می‌کند و DSM موجب تقویت حرکت گهواره‌ای شد؛ در سازه داخلی، اثر DSM وابسته به فرکانس بود. بارگذاری دوجته تأثیر قابل توجهی بر شتاب افقی نداشت اما دامنه فوریه و انرژی شتاب قائم را افزایش داد. اثر SSSI به‌طور کلی دامنه شتاب افقی را کاهش داد، اما حضور سازه دوم در فاصله ۵۰ متر موجب افزایش موضعی شتاب افقی و قائم شد. این یافته‌ها اهمیت استفاده از مدل‌های سه‌بعدی، اعمال رکوردهای حوزه نزدیک و بررسی دقیق اثر SSSI و فاصله بین سازه‌ها را برای کاهش مخاطرات لرزه‌ای، حفاظت از جان انسان‌ها و محیط‌زیست، و طراحی ایمن نیروگاه‌های هسته‌ای با تجهیزات حساس و محتوای فرکانسی بالا برجسته می‌کنند.

نوع مقاله:

مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: /-/

تاریخ ویرایش: /-/

تاریخ پذیرش: /-/

تاریخ انتشار: /-/

واژه‌های کلیدی:

مخاطرات، رفتار لرزه‌ای، سازه نیروگاهی، اختلاط عمیق بلوکی، اندرکنش سازه-خاک-سازه، زلزله حوزه نزدیک، حرکت گهواره‌ای، بارگذاری دوجته.

استناد: نام خانوادگی، نام؛ نام خانوادگی، نام؛ و نام خانوادگی، نام (۱۴۰۰). عنوان مقاله. مخاطرات محیط طبیعی، -- (--). ----

این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می‌باشد. لطفاً برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

مقدمه

فرایند توسعه یک نیروگاه هسته‌ای شامل پنج مرحله اساسی جانمایی، طراحی، ساخت، راه‌اندازی و از رده خارج کردن است. در این میان، انتخاب محل احداث از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، زیرا تحت تأثیر عوامل اجتماعی، اقتصادی، زیست‌محیطی و مهندسی قرار دارد. حفظ ایمنی کارکنان، عموم مردم و محیط زیست در برابر خطرات ناشی از انتشار مواد رادیولوژیکی از اولویت‌های اصلی است. از نظر پدیده‌های طبیعی، انجام مطالعات جامع هواشناسی، زمین‌شناسی، لرزه‌شناسی و هیدرولوژی بر اساس آیین‌نامه‌های معتبر ضرورت دارد. از این رو جانمایی نیروگاه‌های هسته‌ای معمولاً منجر به محدود شدن گزینه‌ها به مناطقی می‌شود که مواجهه با خاک‌های مسئله‌دار (مانند رس نرم، ماسه سست، لای و رسوبات عمیق) و قرارگیری در نزدیکی گسل، اجتناب‌ناپذیر است. این شرایط می‌تواند پیامدهایی نظیر نشست‌های ناهمگن، افزایش فشار آب حفره‌ای، پتانسیل روانگرایی، افزایش تقاضای لرزه‌ای و کاهش حاشیه ایمنی را به همراه داشته باشد. با وجود این، آیین‌نامه‌های جامع بین‌المللی برای برخورد با خاک‌های مسئله‌دار در نیروگاه‌های هسته‌ای تدوین نشده است (وی^۱ و همکاران، ۲۰۱۹). حادثه نیروگاه فوکوشیما دایچی در ۱۱ مارس ۲۰۱۱، که در پی زمین‌لرزه و سونامی متعاقب آن رخ داد، به وضوح نشان داد که مخاطرات طبیعی نظیر زلزله، در صورت عدم پیش‌بینی تمهیدات کافی، می‌توانند به فجایع هسته‌ای غیرقابل جبران منجر شوند. در این حادثه که به عنوان یکی از پرمخاطره‌ترین رویدادهای هسته‌ای تاریخ طبقه‌بندی می‌شود، از کار افتادن سیستم‌های خنک‌کننده اضطراری ناشی از سونامی، ذوب سه راکتور و انتشار گسترده مواد رادیواکتیو در محیط را به دنبال داشت. تجربه فوکوشیما نشان داد که صرف‌نظر از قدرت زمین‌لرزه، ضعف در درک صحیح اثرات متقابل سازه، شالوده و شرایط زمین‌شناسی بستر می‌تواند خسارات ناشی از مخاطرات طبیعی را به شدت تشدید کند (وادا^۲ و همکاران، ۲۰۱۳). از این رو، ارزیابی دقیق عملکرد لرزه‌ای نیروگاه‌ها با در نظر گرفتن اثرات اندرکنش سازه و خاک (SSI) و به‌کارگیری روش‌های نوین به‌سازی بستر، نقشی کلیدی در مدیریت ریسک و کاهش آسیب‌پذیری این زیرساخت‌های حیاتی در برابر مخاطره زمین‌لرزه ایفا می‌کند. پژوهش حاضر با بهره‌گیری از تجربیات، نتایج و روش‌های مطالعات پیشین، به بررسی رفتار لرزه‌ای سازه نیروگاهی APR1400، بر روی بستری می‌پردازد که به روش اختلاط عمیق بلوکی (Deep Soil Mixing - DSM) به‌سازی شده است.

آنالیز لرزه‌ای ساختمان‌های نیروگاه هسته‌ای دارای ویژگی‌های خاصی است. بروز هر حادثه‌ای در ساختمان (نه الزاماً خرابی سازه) می‌تواند پیامدهای ناگواری را برای محیط زیست و ساکنین پیرامون به همراه داشته باشد. خرابی یا حتی وقفه در عملکرد بخشی از تجهیزات هم می‌تواند عواقب مخرب‌تری از خرابی سازه به دنبال داشته باشد. به همین علت مهندسين سازه علاوه بر آنالیز دقیق مقاومت سازه، به تحلیل لرزه‌ای تکیه‌گاه‌های تمامی تجهیزات داخلی نیز علاقمند هستند. از دیگر ویژگی‌های خاص آنالیز لرزه‌ای این ساختمان‌ها آن است که ساختمان‌های اصلی نیروگاه‌های هسته‌ای بسیار سنگین و سخت هستند به همین علت رفتار لرزه‌ای خاک با یا بدون حضور سازه تفاوت قابل ملاحظه‌ای خواهد داشت. در دهه‌های گذشته، با ظهور و توسعه روزافزون سازه‌های حساس، سنگین و بزرگ‌مقیاس، همچون ساختمان‌های نیروگاه هسته‌ای، ضرورت لحاظ اثر اندرکنش خاک و سازه شناسایی شد و الزامات مربوط به آن از اوایل دهه ۱۹۸۰ میلادی در آیین‌نامه‌های مرتبط گنجانده گردید (تحلیل لرزه‌ای سازه‌های هسته‌ای مرتبط با ایمنی و تفسیر آن، ۲۰۱۷). همچنین، در سال‌های اخیر، بررسی عملکرد لرزه‌ای و یکپارچگی

¹ Wie

² Wada

این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می‌باشد. لطفاً برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

رفتاری این نوع ساختمان‌ها، توجه و تمرکز محققان بسیاری را به خود جلب کرده است (کانلوپولوس^۱ و همکاران، ۲۰۲۴). نتایج مطالعات آن‌ها نشان می‌دهد که اندرکنش خاک و سازه می‌تواند به طور چشمگیری پاسخ‌های لرزه‌ای سازه‌ها را تغییر داده و الزامات ایمنی آن‌ها را تحت تأثیر قرار دهد. به‌طور کلی، دو رویکرد اصلی برای مدل‌سازی و بررسی پدیده اندرکنش خاک و سازه وجود دارد: روش زیرسازه و روش مستقیم. در روش زیرسازه، مدل کلی خاک و سازه به چندین زیرسازه تقسیم می‌شود و هر بخش براساس فرضیات خطی به صورت مستقل حل می‌گردد. در نهایت، با استفاده از اصل جمع آثار نیروها، ارتباط بین بخش‌های مختلف از طریق نیروهای اندرکنش برقرار می‌شود (اسلام^۲ و همکاران، ۲۰۲۴)؛ روش‌های تحلیل اندرکنش خاک-سازه لرزه‌ای در طراحی و ارزیابی تأسیسات هسته‌ای، (اسلام^۳ و همکاران، ۲۰۲۲). در روش مستقیم، خاک و سازه به صورت همزمان مدل می‌گردند و برای حل مسأله اندرکنش می‌توان از روش‌های عددی مانند اجزای محدود و المان مرزی یا ترکیبی از هر دو روش (FEM/BEM) استفاده کرد (اسلام^۴ و همکاران، ۲۰۲۴). در ادامه، با مروری بر منابع علمی موجود، تلاش خواهد شد اثر اندرکنش خاک و سازه بر پاسخ لرزه‌ای سازه‌ها، به‌ویژه در ساختمان‌های نیروگاه‌های هسته‌ای، مورد بررسی قرار گیرد.

وانگ^۴ و همکاران (۲۰۱۷)، اثر اندرکنش خاک و سازه بر عملکرد لرزه‌ای نیروگاه HTR-10 در پکن، چین را بررسی کردند. نتایج نشان داد که این اندرکنش باعث کاهش پاسخ لرزه‌ای در طبقات پایین و تغییر محسوس طیف پاسخ در طبقات بالایی می‌شود؛ به‌گونه‌ای که فرکانس بیشینه کاهش و شتاب طیفی در برخی محدوده‌های فرکانسی افزایش می‌یابد. این یافته‌ها تأکید می‌کنند که بررسی دقیق اثرات اندرکنش خاک و سازه برای تجهیزات حساس در طبقات بالایی، به‌ویژه در نیروگاه‌های هسته‌ای، ضروری است. همچنین در این تحقیق، با تغییر ابعاد مدل خاک، پارامترهای مؤثر بر نتایج حاصل از اثر اندرکنش خاک و سازه برای یک سازه نیروگاهی بررسی شد. این پارامترها شامل ابعاد خاک مدل‌سازی شده و نوع مرز جاذب (ویسکوز و ویسکوالاستیک) می‌باشند. بررسی‌ها نشان داد که فاصله مرز قائم خاک تا سازه باید حداقل سه برابر طول سازه در راستای جهت تحریک لرزه‌ای باشد. همچنین برای سازه‌ای با فونداسیون مربع‌شکل، رعایت نسبت ابعادی دو به یک (طول در جهت تحریک به طول در جهت عمود بر تحریک) منجر به نتایج مطلوبی می‌شود. کیتادا^۵ و همکاران (۱۹۹۹) با انجام مطالعات آزمایشگاهی، تحلیل‌های عددی و ساخت سازه‌های نیروگاهی با ابعاد بزرگ نشان دادند که عملکرد لرزه‌ای هر سازه تحت تأثیر مشخصات خاک، چیدمان سازه‌های مجاور، ویژگی‌های دینامیکی آن‌ها، جهت بارگذاری زلزله و عوامل دیگر قرار دارد. همچنین، آن‌ها ثابت کردند که لایه‌های نازک خاک می‌توانند رفتار لرزه‌ای سازه را تغییر دهند و سازه‌های سنگینی مانند رآکتور تاثیر قابل توجهی بر سازه‌های مجاور، مانند توربین، دارند. کلوتهو^۶ و همکاران (۲۰۱۲) با بررسی اثر اندرکنش سازه-خاک نشان دادند که وجود یک ساختمان دوم نسبت به حالت وجود تنها یک ساختمان، تأثیر کمی بر پاسخ هر دو ساختمان با فونداسیون‌های سطحی دارد؛ اما این تأثیر می‌تواند در صورت استفاده از فونداسیون‌های مدفون، قابل توجه‌تر باشد. روی^۷ و همکاران (۲۰۱۵) اثر اندرکنش سازه-خاک-سازه را بررسی کردند. نتایج نشان داد که سازه‌های مجاور می‌توانند پاسخ دینامیکی یک سازه را به‌طور قابل توجهی تحت تأثیر قرار دهند و این تأثیر به نزدیکی سازه‌ها،

¹ Kanellopoulos

² Islam

³ Islam

⁴ Wang

⁵ Kitada

⁶ Clouteau

⁷ Roy

این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می‌باشد. لطفاً برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

سختی خاک و عمق فونداسیون وابسته است. در سازه‌های سنگین نزدیک به هم و در خاک‌های سخت، شتاب پاسخ می‌تواند تا بیش از $5/3$ برابر افزایش یابد. کاهش سختی خاک، افزایش فاصله و کاهش عمق مدفون این اثرات را کاهش می‌دهد. پژوهش‌ها تأکید دارند که هر مورد باید به صورت جداگانه و موردی تحلیل شود. لی^۱ و وسلی^۲ (۱۹۷۳) با بررسی مدل‌های سازه‌ای بسیار ساده شده نشان دادند که اندرکنش بین سازه‌های مجاور می‌تواند پاسخ دینامیکی طیف گسترده‌ای از سازه‌ها را تحت تأثیر قرار دهد. این اثرات به‌ویژه در مورد سازه‌های بزرگ، مانند نیروگاه‌های هسته‌ای، بسیار قابل توجه هستند و در شرایطی که سازه‌ها بر روی بستری غیر از سنگ سخت قرار گرفته باشند، شدت اندرکنش سازه-خاک-سازه افزایش می‌یابد. بولی‌ستی^۳ و ویتاکر^۴ (۲۰۱۸) نیز با در نظر گرفتن جرم و فاصله بین سازه‌های نیروگاهی، به بررسی اثرات اندرکنش سازه-خاک-سازه پرداختند. یافته‌های آن‌ها نشان داد که اثرات اندرکنش سازه-خاک-سازه در محدوده فرکانس حرکت گهواره‌ای راکتور بیشترین شدت را دارد. همچنین، زمانی که اختلاف جرم بین سازه‌های مجاور زیاد باشد، این اثرات شدت بیشتری پیدا می‌کنند. همچنین افزایش^۴ برابری جرم دو راکتور مجاور تغییر قابل ملاحظه‌ای بر پاسخ لرزه‌ای آن‌ها مشاهده نشد. یو^۵ و همکاران (۲۰۱۳)، اثرات اندرکنش خاک-سازه-خاک (SSSI) را برای دو سازه نیروگاهی با پی‌های مدفون بررسی کردند. نتایج مطالعات آن‌ها نشان داد که ساختمان سبک‌تر توربین تأثیر ناچیزی بر ساختمان راکتور دارد. این یافته‌ها تأیید می‌کنند که ساختمان‌های سنگین‌تر در جزیره نیروگاهی می‌توانند بر عملکرد لرزه‌ای سازه‌های سبک‌تر مجاور تأثیرگذار باشند.

اندرسون^۶ و همکاران (۲۰۱۵)، تأثیر پارامترهایی مانند مشخصات زلزله، خاک و سازه را بر اندرکنش سازه-خاک-سازه (SSSI) ساختمان‌های نیروگاهی مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که ساختمان کنترل تأسیسات پیش‌فراوری به دلیل اثر اندرکنش با سازه مجاور بزرگ‌تر، افزایش قابل توجهی در بارهای تقاضای لرزه‌ای تجربه می‌کند. لی^۷ و همکاران (۱۹۷۳) پیشنهاد کردند که اثرات اندرکنش سازه-خاک-سازه (SSSI) را می‌توان در سایت‌های دارای سنگ بستر نادیده گرفت، اما در سایت‌هایی با شرایط غیر سنگ بستر باید توجه قرار گیرد. با این حال، تمامی این یافته‌ها نشان می‌دهند که مکانیزم (SSSI) بین سازه‌های مجاور در نیروگاه‌های هسته‌ای بسیار پیچیده بوده و آثار آن در هر مورد متفاوت است و باید به‌صورت موردی ارزیابی شود. کانلوپولوس^۸ و همکاران (۲۰۲۴) با مدل‌سازی عددی، اثر پدیده اندرکنش سازه-خاک-سازه (SSSI) در یک نیروگاه هسته‌ای ایده‌آل را بررسی کردند. نتایج نشان داد که نادیده گرفتن SSI همیشه محافظه‌کارانه نیست و می‌تواند مود ارتعاشی اضافی گهواره‌ای ایجاد کند که در مدل پایه صلب مشاهده نمی‌شود. حضور سازه‌های جانبی نیز شتاب طیفی را به‌ویژه در فرکانس شدید ساختمان افزایش می‌دهد. اثرات SSSI بسته به ویژگی‌های سازه‌ای و شرایط محل ممکن است مفید یا مخرب باشد و توصیه شد سطح دقت و پیچیدگی مدل‌سازی در تحلیل نیروگاه‌های هسته‌ای افزایش یابد. مرادی^۹ و همکاران نشان دادند که اعمال اختلاط عمیق خاک به‌صورت بلوکی (DSM) در سازه‌های نیروگاهی می‌تواند به‌طور قابل توجه شتاب افقی وارد بر سازه را کاهش دهد. یغفوری و همکاران (۲۰۲۶، ۲۰۲۵) نیز با بررسی رفتار لرزه‌ای خاک

¹ Lee

² Wesley

³ Bolisetti

⁴ Whittaker

⁵ Yue

⁶ Anderson

⁷ Li

⁸ Kanellopoulos

⁹ Moradi

این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می باشد. لطفا برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

اصلاح شده به روش DSM، دریافتند که افزایش ضخامت بلوک های اختلاط عمیق منجر به کاهش شتاب افقی و همزمان افزایش دامنه شتاب قائم ناشی از حرکت گهواره ای می شود. آن ها یک چهارم متوسط طول موج برشی در خاک را به عنوان ضخامت بهینه بلوک های DSM پیشنهاد کردند.

داده ها و روش ها

مطالعه موردی

مشخصات لایه های خاک

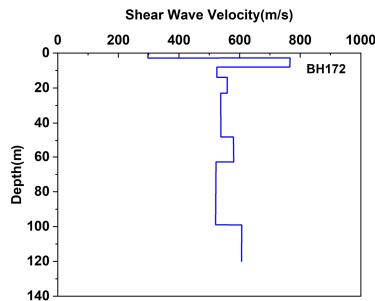
در این پژوهش، مشخصات خاک بر اساس نتایج آزمایشگاهی و ارزیابی های میدانی یک پروژه نیروگاهی در حال اجرا به دست آمده است. عملیات حفاری مغزه گیری با استفاده از دستگاه های مختلف Mobil Drill و سری XY انجام شده است (شکل ۱). بر پایه این نتایج، ۱۴ واحد مهندسی-زمین شناسی (EGE) در محدوده پروژه شناسایی شد که شامل ترکیب های مختلفی از رس، لای، ماسه در اندازه های گوناگون، ماسه سنگ و سنگ شکسته بوده و نشان دهنده تنوع بالایی لایه های زیرسطحی تا عمق بیش از ۲۰۰ متر است.



شکل ۱: دستگاه حفاری Mobil Drill XY.

در منطقه مورد مطالعه، سرعت موج طولی بین ۴۰۰ تا ۲۷۰۰ متر بر ثانیه و سرعت موج برشی بین ۱۵۶ تا ۹۰۰ متر بر ثانیه متغیر است. بیشترین مقادیر سرعت موج برشی در لایه ای نزدیک سطح زمین (عمق ۲-۳ متر، ضخامت ۵-۶ متر) مشاهده شد و به طور کلی با افزایش عمق افزایش می یابد. پروفیل نمونه گمانه ۱۷۲ تا عمق ۲۰ متر در شکل ۲ ارائه شده است.

این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می باشد. لطفاً برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.



شکل ۲: پروفیل‌های سرعت موج برشی گمانه ۱۷۲.

در این پژوهش، مشخصات ۱۱ لایه خاک انتخاب شده از یک گمانه به عمق ۱۲۰ متر واقع در زیر یکی از ساختمان‌های اصلی مورد استفاده قرار گرفته است. ویژگی‌های این یازده لایه خاک در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱: مشخصات لایه‌های خاک بر اساس نتایج حاصل از گمانه ۱۲۰ متری

شماره	ضخامت (m)	چگالی t/m^3	$V_s (\frac{m}{s})$	$V_p (\frac{m}{s})$
۱	۳	۱/۸	۴۰۰	۶۰۰
۲	۴	۲	۶۲۰	۱۳۰۰
۳	۷	۲/۰۲	۴۵۰	۲۲۵۰
۴	۴	۱/۹۶	۴۹۵	۲۲۳۰
۵	۱۵	۲/۰۲	۵۰۰	۲۱۹۰
۶	۱۳/۵	۱/۹۹	۵۵۰	۲۰۳۰
۷	۹/۵	۲/۰۳	۶۳۰	۲۰۴۰
۸	۱۷	۲/۰۳	۵۴۰	۲۰۷۰
۹	۱۵/۵	۲	۵۴۰	۲۳۳۰
۱۰	۱۸/۵	۲/۰۳	۶۱۰	۲۳۸۰
۱۱	۳	۲	۶۱۰	۲۳۷۰

مشخصات اختلاط عمیق بلوکی

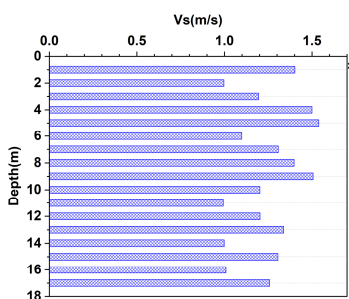
برای طراحی ستون‌های اختلاط عمیق بلوکی (DSM)، شش گمانه در سایت حفر و حدود ۹۰۰ کیلوگرم نمونه خاک جمع‌آوری شد. آزمایش‌های خاک-سیمان با انواع سیمان نوع ۲ و نوع ۵ و نسبت‌های مختلف آب به سیمان و زمان‌های عمل‌آوری ۷، ۱۴، ۲۸ و ۵۶ روز انجام شد تا مقاومت فشاری نمونه‌ها تعیین گردد. نتایج نشان داد که سیمان نوع ۵ با نسبت کل آب به سیمان ۱/۷ و نسبت آب به دوغاب ۱ مناسب‌ترین گزینه برای شرایط سولفاتی و افزایش مقاومت ستون‌ها است. قطر ستون‌ها ۱/۶ متر و همپوشانی ۲۰ درصد در نظر گرفته شد. نمودار مقاومت فشاری نمونه‌های برداشت شده برای سیمان نوع ۵ و نسبت‌های مختلف آب به سیمان در شکل ۳-ز نشان داده شده است. برای اعتبارسنجی و بهینه‌سازی، یازده ستون آزمایشی ساخته شد و نمونه‌گیری در سنین عمل‌آوری مختلف انجام شد، که نتایج آزمایشگاهی و میدانی نشان‌دهنده عملکرد مناسب ستون‌ها بود (شکل ۳).

این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می باشد. لطفاً برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

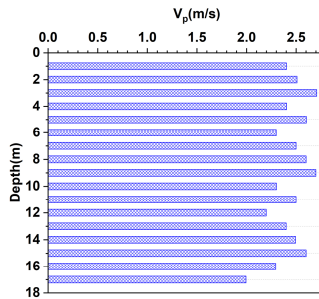
در نهایت، برای مدل سازی ستون های اختلاط عمیق در مدل های اجزای محدود، خواص مکانیکی آن، بر اساس نتایج آزمایشگاهی و مطابق جدول ۲، در نظر گرفته شد. در مدل های اجزای محدود ضخامت اختلاط عمیق بلوکی ۱۸ متر لحاظ شده است. بر اساس مدل سازی اجزای محدود سازه راکتور و سایر سازه های موجود در یک جزیره نیروگاهی، مشخص گردید که نشست های ایجاد شده در زیر سازه تحت بارگذاری ثقلی (با توجه به وزن بالای سازه راکتور) بیش از حد مجاز است. لذا با انجام آنالیزهای متعدد، ضخامت ۱۸ متر برای اختلاط عمیق بلوکی به منظور کنترل نشست و محدود کردن آن، بر اساس آیین نامه های موجود پیشنهاد گردید. علاوه بر این، مطالعات پیشین نشان داده اند که ضخامت بهینه برای اجرای اختلاط عمیق بلوکی از دید رفتار لرزه ای، بین یک چهارم تا یک پنجم متوسط سرعت موج برشی در لایه های خاک است. با توجه به پروفیل خاک موجود در منطقه مورد بررسی، عملکرد بهینه در ضخامت حدود ۱۸ متر برای اختلاط عمیق حاصل خواهد شد. از این رو، مبنای بررسی رفتار لرزه ای سازه، ضخامت ۱۸ متر برای اختلاط عمیق بلوکی لحاظ گردیده است (یغفوری و همکاران ۲۰۲۵).

جدول ۲: خواص خاک بهبود یافته.

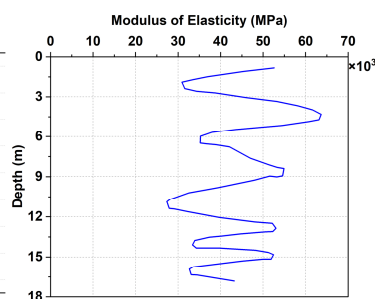
چگالی t/m^3	$V_s (\frac{m}{s})$	$V_p (\frac{m}{s})$
۲/۳	۱۳۰۰	۲۴۰۰



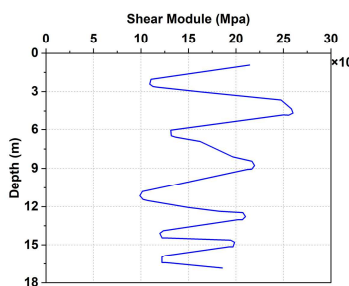
(الف)



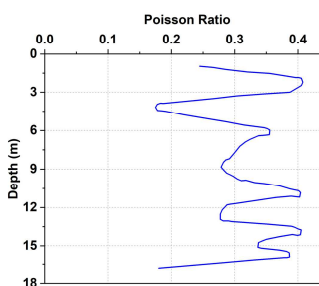
(ب)



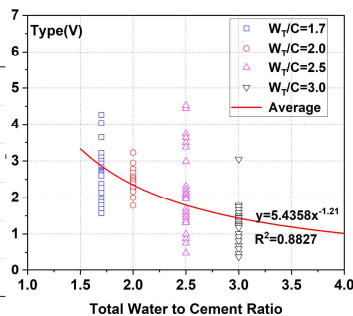
(ج)



(د)



(ه)



(ز)

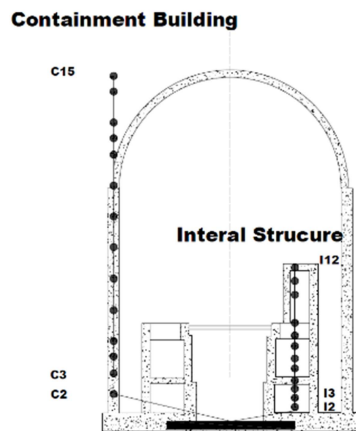
شکل ۳: نتایج آزمایش های آزمایشگاهی و میدانی روی ستون های DSM. (الف) سرعت موج برشی؛ (ب) سرعت موج طولی؛ (ج) مدول الاستیسیته؛ (د) مدول برشی؛ (ه) ضریب پواسون؛ (ز) مقاومت فشاری تک محوری (Q_u) به عنوان تابعی از نسبت کل آب به سیمان.

سیمان نوع V.

این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می باشد. لطفاً برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

مشخصات سازه

مطابق شکل ۴ به منظور ساده سازی مدل و کاهش هزینه های محاسباتی، ساختمان محفظه و سازه داخلی به صورت مدل تیر-ستون معادل با جرم های متمرکز مدل شده اند. استفاده از مدل های تیر-ستون معادل با جرم های متمرکز، روشی متداول در تحلیل سازه ای نیروگاه ها به شمار می رود. علاوه بر این، آیین نامه های تحلیل و طراحی سازه های نیروگاهی نیز استفاده از این نوع مدل سازی را مجاز و پذیرفته شده می دانند (ون گوین و همکاران، ۲۰۲۰). جزئیات مدل جرم متمرکز ساختمان محفظه و سازه داخلی در جدول ۳ و ۴ ارائه شده اند.



شکل ۴: مدل جرم متمرکز سازه نیروگاهی (ون گوین و همکاران، ۲۰۲۰).

جدول ۳: ویژگی های ساختمان محفظه (ون گوین و همکاران، ۲۰۲۰).

گره - سازه داخلی	ارتفاع (m)	جرم متمرکز (ton)	گره اتصال	سطح مقطع (m^2)	ممان اینرسی (m^4)	ممان پیچشی (m^4)
۱	۰	۸۵۳/۷	-	-	-	-
۲	۳/۵	۱۶۳۳/۱	C۱ - C۲	۲۰۲/۹	۵۶۲۹۹/۸	۱۱۲۶۳۴/۲
۳	۷	۱۸۱۸/۴	C۲ - C۳	۲۰۲/۹	۵۶۲۹۹/۸	۱۱۲۶۳۴/۲
۴	۱۱	۱۸۵۶/۳	C۳ - C۴	۲۰۲/۹	۵۶۲۹۹/۸	۱۱۲۶۳۴/۲
۵	۱۴	۱۶۷۱	C۴ - C۵	۲۰۲/۹	۵۶۲۹۹/۸	۱۱۲۶۳۴/۲
۶	۱۸	۲۳۰۱/۴	C۵ - C۶	۲۰۲/۹	۵۶۲۹۹/۸	۱۱۲۶۳۴/۲
۷	۲۴	۳۰۸۰/۸	C۶ - C۷	۲۰۲/۹	۵۶۲۹۹/۸	۱۱۲۶۳۴/۲
۸	۳۰/۵	۳۲۶۶/۱	C۷ - C۸	۲۰۲/۹	۵۶۲۹۹/۸	۱۱۲۶۳۴/۲
۹	۳۷	۳۱۱۸/۷	C۸ - C۹	۲۰۲/۹	۵۶۲۹۹/۸	۱۱۲۶۳۴/۲
۱۰	۴۴	۳۰۴۰/۳	C۹ - C۱۰	۲۰۲/۹	۵۶۲۹۹/۸	۱۱۲۶۳۴/۲
۱۱	۵۰	۳۶۹۵/۲	C۱۰ - C۱۱	۲۰۲/۹	۵۶۲۹۹/۸	۱۱۲۶۳۴/۲
۱۲	۵۴	۲۷۴۵/۱	C۱۱ - C۱۲	۲۰۲/۹	۵۶۲۹۹/۸	۱۱۲۶۳۴/۲
۱۳	۶۲	۳۴۸۶/۵	C۱۲ - C۱۳	۱۷۹/۸	۴۷۵۹۱/۲	۹۵۱۹۹/۷
۱۴	۷۰	۳۴۵۲/۹	C۱۳ - C۱۴	۱۷۹/۸	۳۵۸۶۱/۷	۷۱۷۳۲
۱۵	۷۸	۱۴۴۲/۹	C۱۴ - C۱۵	۱۶۶/۱	۱۲۸۲۵/۶	۲۵۶۵۱/۳

این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می باشد. لطفاً برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

جدول ۴: ویژگی‌های سازه داخلی (ون گوین و همکاران، ۲۰۲۰).

ممان پیچشی (m^4)	ممان اینرسی (m^4)	سطح مقطع (m^2)	گره اتصال	جرم متمرکز (ton)	ارتفاع (m)	گره - سازه داخلی
-	-	-	-	۱۸۰۶/۱	۰	۱
۱۶۴۹۸۹/۷	۷۹۸۹۶/۹	۸۳۳/۲	I۱-I۲	۳۳۴۸	۱/۵	۲
۱۶۷۳۸۹/۱	۸۱۹۴۲/۵	۸۸۴	I۲-I۳	۷۸۱۰/۸	۳/۵	۳
۱۶۵۹۵۷/۸	۸۰۷۱۰/۱	۸۵۷/۹	I۳-I۴	۵۱۳۵/۴	۷	۴
۳۷۷۵۳/۴	۲۱۲۵۳/۴	۸۱۳/۸	I۴-I۵	۲۶۷۸/۳	۹	۵
۳۵۸۱۱/۷	۱۹۴۴۳	۲۵۴/۶	I۵-I۶	۲۹۰۵/۶	۱۱	۶
۳۵۲۳۳/۹	۱۹۳۸۴	۲۲۱/۹	I۶-I۷	۲۹۱۱/۲	۱۴	۷
۳۶۵۷۱/۳	۲۰۱۶۶/۳	۲۶۱/۴	I۷-I۸	۳۴۸۶	۱۶	۸
۳۴۵۶۶/۹	۱۸۵۲۴/۱	۲۰۲/۸	I۸-I۹	۷۸۹/۵	۱۸	۹
۳۴۵۶۶/۹	۱۸۵۲۴/۱	۲۰۲/۸	I۹-I۱۰	۲۵۹۵/۲	۲۰	۱۰
۳۴۵۶۶/۹	۱۸۵۲۴/۱	۲۰۲/۷	I۱۰-I۱۱	۲۵۰۷/۴	۲۴	۱۱
۷۸۸۸/۶	۴۶۶۶/۷	۱۰۳/۲	I۱۱-I۱۲	۲۶۶۵/۱	۲۹/۵	۱۲
۴۸۴۰	۴۶۴۲/۶	۹۷/۹	I۱۲-I۱۳	۷۹۸/۱	۳۴/۵	۱۳

مشخصات بتن مورد استفاده در تحلیل (سازه و فونداسیون) در جدول ۵ ارائه شده است. در مدل‌های اجزای محدود شعاع فونداسیون ۵۰ متر و ضخامت آن ۸ متر در نظر گرفته شده است.

جدول ۵: ویژگی‌های مصالح بتن.

چگالی (t/m^3)	نسبت پواسون	مدول الاستیسیته (kN/m^2)
2.4	0.17	3.045×10^7

مدل‌سازی

جزئیات مدل‌سازی عددی

در این پژوهش، مطابق شکل ۵ یک الاستوپلاستیک المان محدود برای بررسی اندرکنش خاک و سازه و همچنین اندرکنش سازه-خاک-سازه توسعه داده شد. تحلیل‌ها با استفاده از نرم‌افزار OpenSees V3.5.0 انجام گرفت (مازونی^۱ و همکاران، ۲۰۰۶). برای مراحل پیش‌پردازش و پس‌پردازش نیز از نرم‌افزار GiD V14.0.1 و نرم‌افزار Origin استفاده شد (ریباو و همکاران، ۱۹۹۸). مدلسازی خاک با استفاده از المان‌های چهارگره‌ای چهارضلعی و مدل رفتاری دراگر-پراگر انجام گرفت و برای هر المان، پارامترهای خاک بر اساس نتایج آزمایشگاهی تعیین شدند. در مدل‌سازی روسازه، به صورت الاستیک و از المان elasticBeamColumn استفاده شد. فونداسیون و اختلاط عمیق بلوکی با استفاده از المان‌های ۴ گره‌ای و به صورت الاستیک مدل شدند. مطابق شکل‌های ۵-الف و ۵-ب، به منظور جلوگیری از بازتاب امواج در مرزهای مدل، در امتداد لبه‌های جانبی و تحتانی، از ترکیب میراگر لایسمر-کولمبیر و ستون میدان آزاد به عنوان مرز جاذب استفاده شد. این روش که در تحلیل‌های دوبعدی و سه‌بعدی قابل بهره‌برداری است، به صورت شماتیک در محیط دوبعدی در شکل (۶-الف) نشان داده شده است. در این تصویر، بخش F میدان آزاد است که به صورت موازی با محیط اصلی خاک تحلیل می‌شود؛ بخش D میراگرهای کولمبیر-لایسمر را نشان می‌دهد که برای

¹ Mazzoni

این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می‌باشد. لطفاً برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

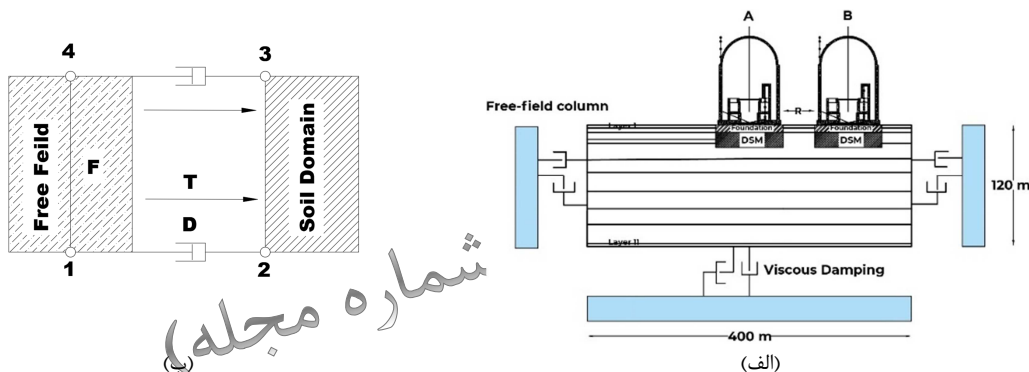
جذب امواج خروجی مدل‌سازی شده‌اند؛ و بخش T بیانگر نیروهای مرزی منتقل‌شده از میدان آزاد به محیط اصلی خاک است. بدین ترتیب، نیروهای حاصل از تحلیل میدان آزاد از این مسیر به مرزهای محیط اصلی منتقل می‌شوند (جرمیک^۱ و همکاران، ۲۰۰۹؛ نیلسن^۲، ۲۰۰۶).

به بیان دیگر، مرزهای جانبی شبکه اصلی از طریق میراگرهای ویسکوز به شبکه میدان آزاد متصل شده‌اند تا مرزهایی با رفتار آرام ایجاد شود (مطابق شکل ۳-۲). همچنین، نیروهای نامتعادل تولیدشده در شبکه میدان آزاد بر مرز شبکه اصلی اعمال می‌گردند. هر دو وضعیت در روابط (۳) و (۴) تعریف شده‌اند.

$$F_x = -\rho C_p (V_x^m - V_x^{ff}) A + F_x^{ff} \quad (1)$$

$$F_y = -\rho C_s (V_y^m - V_y^{ff}) A + F_y^{ff} \quad (2)$$

که در آن: ρ چگالی محیط، C_p و C_s به ترتیب سرعت موج‌های فشاری و برشی در مرز جانبی، V_x^m و V_y^m سرعت‌های مؤلفه‌های x و y در نقاط شبکه اصلی در مرز جانبی، A سطح تأثیر نقطه شبکه میدان آزاد، V_x^{ff} و V_y^{ff} سرعت‌های مؤلفه‌های x و y در نقاط شبکه میدان آزاد و F_x^{ff} و F_y^{ff} نیروهای متناظر میدان آزاد در جهت‌های x و y هستند.



شماره مجله

شکل ۵: (الف) نمای کلی مدل خاک-سازه در تحلیل لرزه‌ای، (ب) نمای شماتیکی از سه جزء اصلی یک المان جاذب (چنین دمیر^۳ و زولفیکار^۴، ۲۰۲۴).

برای شبیه‌سازی اندرکنش بین بلوک‌های خاک بهسازی‌شده و طبیعی مجاور و همچنین اندرکنش بین خاک بهسازی‌شده و فونداسیون، درجه‌های آزادی گره‌های متناظر در دو جهت افقی و قائم با استفاده از دستور equal مقید شدند. هندسه مدل‌های خاک و سازه ابتدا در نرم‌افزار GiD ایجاد و به صورت جداگانه مش‌بندی شد. از آنجا که GiD تنها به عنوان پیش‌پردازنده تولید مش عمل می‌کند، خروجی آن به صورت فایل متنی استخراج و در MATLAB وارد شد. کدهای اختصاصی، آرایش گره‌ها را سازمان‌دهی کرده و خواص مصالح شامل مدول برشی، ضریب پواسون، چگالی و سایر پارامترهای مکانیکی را مطابق الزامات ورودی OpenSees به المان‌ها اختصاص دادند. در مرحله تحلیل اجزای محدود، هندسه مدل‌ها در OpenSees بارگذاری و شرایط مرزی مناسب اعمال شد. با توجه به محدودیت‌های OpenSees در بخش پس‌پردازش، تمامی خروجی‌ها به صورت فایل متنی ذخیره و سپس در MATLAB پردازش و برای گره‌ها و المان‌ها تفکیک شدند. در نهایت، داده‌های پردازش‌شده جهت ترسیم و مصورسازی به نرم‌افزار Origin منتقل شد. برای بارگذاری لرزه‌ای، از رکوردهای زلزله نزدیک‌گسل و همچنین موجک‌های Ricker با محتوای

¹ Jeremic

² Nielsen

³ Çetindemir

⁴ Zülfikar

این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می‌باشد. لطفاً برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

فرکانسی متفاوت استفاده گردید. بر اساس بند C2.5.3 استاندارد ASCE 4-16 (تحلیل لرزه‌ای سازه‌های هسته‌ای)^۱، نسبت شتاب قائم به افقی (V/H) تابعی از فرکانس، فاصله از گسل، شرایط خاک، بزرگی و نوع گسلش است و معمولاً از PSHA به دست می‌آید. در نزدیکی گسل (فاصله کمتر از ۱۵ کیلومتر)، خاک‌های هولوسن یا لایه‌های ضحیم باید V/H را به‌طور اختصاصی محاسبه کرد؛ در غیر این صورت مقدار محافظه‌کارانه $\frac{2}{3}$ توصیه می‌شود. بزرگنیا و کمپیل^۲ (بزرگنیا و کمپیل ۲۰۰۴) نشان داده‌اند که V/H به شدت به دوره تناوب، شرایط خاک و فاصله از چشمه لرزه‌زا وابسته است و در حوزه نزدیک گسل در دوره‌های کوتاه تا حدود ۱/۸ افزایش می‌یابد. در پژوهش حاضر، با وجود استخراج طیف ویژه ساختگاه بر مبنای گسل‌های منطقه و انجام تحلیل‌های طراحی بر آن اساس، هدف اصلی بررسی رفتار لرزه‌ای سازه فقط تحت یک رکورد حوزه نزدیک بوده است تا پدیده حرکت گهواره‌ای شدید ناشی از اجرای اختلاط عمیق بلوکی (موضوعی که کمتر مطالعه شده) ارزیابی شود.

اندازه المان‌ها و گام زمانی تحلیل دینامیکی براساس معیار Courant–Friedrichs–Lewy (CFL) و با توجه به فرکانس غالب هر تحلیل تعیین شد؛ به نحوی که اندازه المان از یک دهم کوچکترین طول موج تجاوز نکند انتخاب شده است. انتخاب گام زمانی (Δt) برای حل معادلات، باید به نحوی انتخاب شود که به اندازه کافی کوچک باشد تا سریع‌ترین موج در یک گام زمانی بیشتر از نقطه بعدی شبکه پیش نرود (جرمیک^۳ و همکاران، ۲۰۰۹). در این تحقیق براساس مشخصات حاکم بر هر تحلیل، اندازه المان‌ها در بازه ۱ تا ۲ متر و گام زمانی در محدوده ۰/۰۱ تا ۰/۰۲ ثانیه انتخاب گردید. بسته به مدل، تعداد گره‌ها بین ۴۳۸۶ تا ۶۱۴۰۸ و تعداد المان‌ها بین ۴۲۴۲ تا ۶۰۸۵۳ متغیر بود. در مدل‌سازی‌های ژئوتکنیکی، تعیین دقیق شرایط اولیه اهمیت بسزایی در دستیابی به نتایج معتبر دارد. بدین منظور، یک تحلیل مرحله‌ای جهت ایجاد تنش اولیه سازگار و تضمین پاسخ دینامیکی قابل اعتماد به کار گرفته شد. ابتدا بارهای ثقلی بر مدل خطی-الاستیک اعمال شد تا تنش قائم اولیه و یک میدان تنش پایدار در خاک ایجاد شود. سپس رفتار المان‌های خاک به الاستوپلاستیک تغییر یافت و تحلیل ثقلی تا دستیابی به تعادل ادامه پیدا کرد تا تنش اولیه با رفتار غیرخطی خاک سازگار گردد. پس از تکمیل این مرحله، تاریخچه زمانی شتاب به‌عنوان بارگذاری دینامیکی اعمال شد. این رویکرد مرحله‌ای شرایط تنش مؤثر اولیه را به‌صورت دقیق پیش از اعمال بارگذاری لرزه‌ای برقرار کرده و از بروز ناپایداری عددی یا پاسخ‌های غیرواقعی ناشی از تنش‌های اولیه ناسازگار جلوگیری می‌کند.

تحلیل تاریخچه زمانی با گام زمانی ثابت و به روش Penalty Method برای اعمال قیود انجام شد. برای حل دستگاه معادلات، روش Krylov–Newton به‌عنوان الگوریتم تکرارگر انتخاب گردید و همگرایی نتایج با آزمون Norm Displacement Increment Test در آستانه خطای تعیین‌شده بررسی شد. به‌منظور شماره‌گذاری معادلات و ارتباط آن‌ها با درجه‌های آزادی، از RCM Numberer بر پایه روش Reverse Cuthill–McKee استفاده شد. برای انتگرال‌گیری زمانی نیز از روش TRBDF2، که ترکیبی از قاعده دوزنقه‌ای (Trapezoidal Rule) و روش پرسو سه‌نقطه‌ای (Three-Point Backward Euler Method) است، بهره گرفته شد. در مدل‌های بررسی‌شده، میرایی رایلی به میزان ۵٪ برای خاک در نظر گرفته شد. مقدار ضرایب میرایی رایلی (α, β) بر اساس نتایج آزمایشگاهی و طبق روابط (۳) و (۴) محاسبه گردید (ون گوین و همکاران، ۲۰۲۰).

$$\alpha = \xi \frac{2\omega_n \omega_m}{\omega_n + \omega_m} \quad (3)$$

¹ Seismic analysis of safety-related nuclear structures

² Campbell

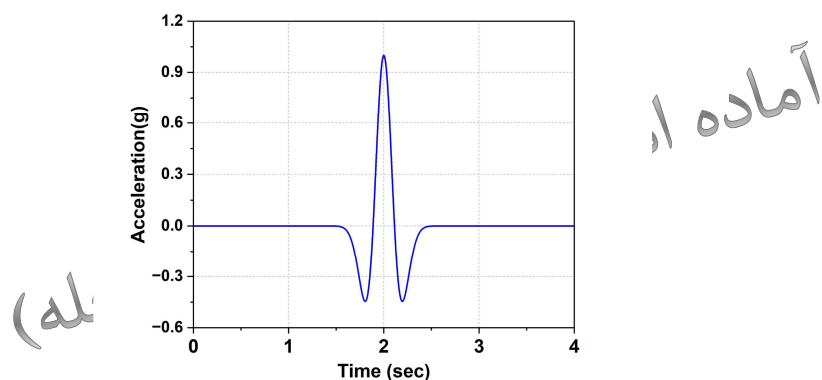
³ Jeremic

این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می‌باشد. لطفاً برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

$$\beta = \xi \frac{2}{\omega_n + \omega_m} \quad (4)$$

بارگذاری زلزله

در این پژوهش، برای ارزیابی عملکرد لرزه‌ای رآکتور APR1400 از دو نوع بارگذاری زلزله استفاده شده است. در گام نخست، به‌منظور بررسی رفتار سازه تحت بارگذاری یک‌جهته، مطابق با شکل ۶ از موجک ریکر استفاده شد. در گام دوم، زلزله‌ی حوزه‌ی نزدیک و پالس‌دار پارکفیلد^۱ در ایستگاه چولم^۲، بر اساس مشخصات ارائه‌شده در جدول ۶، مورد استفاده قرار گرفت. حداکثر شتاب افقی رکورد زلزله پارکفیلد برابر با 0.4g در نظر گرفته شد. همچنین، حداکثر شتاب مؤلفه قائم معادل دو سوم حداکثر شتاب افقی و برابر با 0.25g مقیاس گردید. تاریخچه‌ی شتاب افقی و قائم این زلزله و طیف پاسخ متناظر آن‌ها (با فرض میرایی ۵ درصد) در شکل ۷ نمایش داده شده است. لازم به ذکر است که با توجه به نوع مرز نیمه‌بی‌نهایت به‌کاررفته در مرز پایینی مدل‌های اجزای محدود خاک، تاریخچه‌ی سرعت زلزله در عمق ۱۲۰ متری هر مدل اعمال شده است.



شکل ۶: موجک ریکر اعمال‌شده در مدل‌سازی رفتار لرزه‌ای سازه و خاک

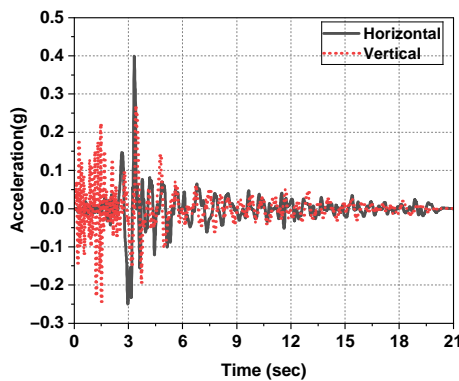
جدول ۶: مشخصات زلزله استفاده شده در این بخش از پژوهش.

نوع	مخنوی فرکانسی	PGA/PGV	PGV (m/s)	Rjb(km)	PGA(g)	نام ایستگاه	زلزله
پالس	متوسط	۰/۹۷	۰/۶۴	۱/۶۳	۰/۶۲	پارکفیلد-چولم	پارکفیلد۰۲

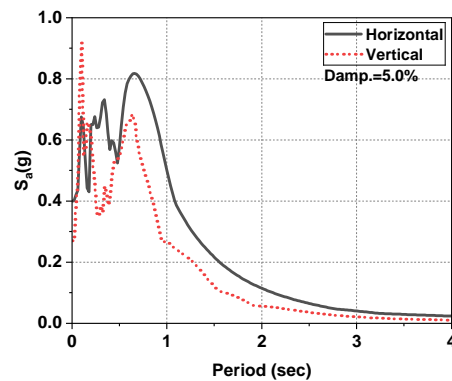
^۱ Parkfield

^۲ Cholame

این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می باشد. لطفا برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.



(الف)

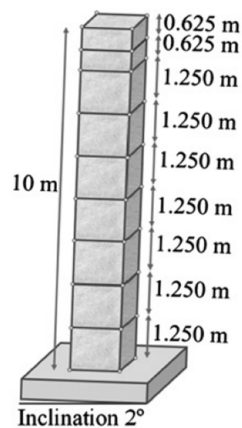


(ب)

شکل ۷: تاریخچه زمانی شتاب مقیاس شده مؤلفه های افقی و قائم زلزله پارکفیلد و طیف پاسخ متناظر هر یک از آن ها.

صحت سنجی

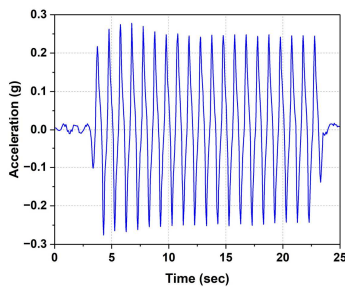
کامیلو^۱ و همکاران (۲۰۱۲) با استفاده از تست سانتریفیوژ و دو مدل سازی عددی در نرم افزار OpenSees به بررسی گسترش جانبی در زمین آزاد پرداختند. مدل عددی اول شامل ۲۶۸۰ گره و ۲۱۱۳ المان BrickUP در فضای سه بعدی بود. به توجه به زمان بالای آنالیز در مدل اول، فرض شد که می توان با مدل سازی یک تیر طره در فضای سه بعدی، مطابق با شکل ۸، نتایج تست سانتریفیوژ را شبیه سازی کرده و گسترش جانبی در زمین آزاد را با صرف زمان کمتر ارزیابی کرد. مدل مذکور شامل ۴۰ گره و ۹ المان BrickUP در فضای سه بعدی بود. در این مدل، درجات آزادی در جهات x، y و z در گره هایی با ارتفاع برابر مقید شده بودند. در مرز پایین مدل، تمامی درجات آزادی گره ها بسته شدند. در مدل عددی از ماسه نوادا با تراکم ۳۵-۴۵ درصد استفاده شد. برای شبیه سازی رفتار ماسه اشباع، از مدل رفتاری PDMY استفاده گردید. مدل تحت رکورد زلزله مطابق با شکل ۹-الف تحلیل شد. نتایج حاصل از آنالیز و شبیه سازی انجام شده در این پژوهش برای $\xi_{small strain} = 1\%$ در شکل ۹-ب و ۹-ج نشان داده شده است.



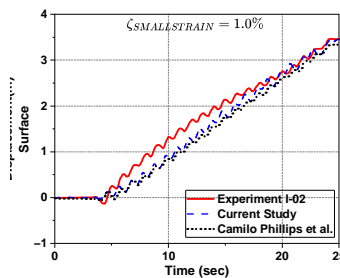
شکل ۸: هندسه پروفیل خاک (کامیلو و همکاران، ۲۰۱۲).

¹ Camilo

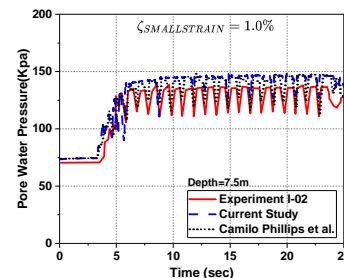
این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می باشد. لطفاً برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.



(الف)



(ب)



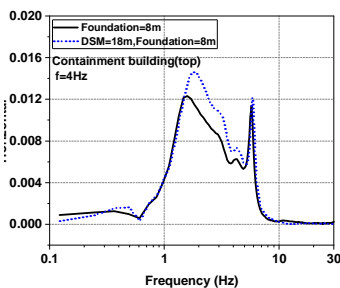
(ج)

شکل ۹: (الف) شتاب‌نگاشت ورودی اعمال شده در پایه آزمایش I-02 (ب) مقایسه جابه‌جایی مرزی در شبیه‌سازی عددی و آزمایش سانتریفیوژ I-02، (ج) مقایسه تاریخچه زمانی فشار آب حفره‌ای در شبیه‌سازی عددی و آزمایش سانتریفیوژ I-02 (کامیلو و همکاران، ۲۰۱۲).

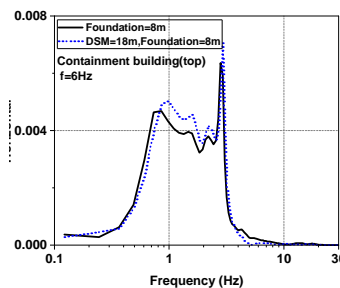
نتایج

ارزیابی رفتار لرزه‌ای سازه با در نظر گرفتن اثر اندرکنش خاک-سازه تحت بارگذاری یک‌جهته

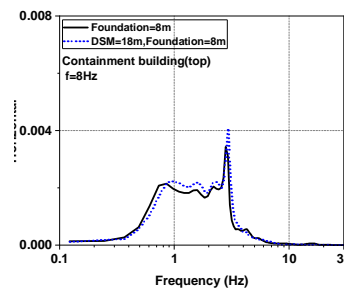
ابتدا با مدل‌سازی ساختمان رآکتور (A) (شکل ۵-الف) به ارزیابی رفتار لرزه‌ای رآکتور APR1400 پرداخته شد. شکل‌های ۱۰ به ترتیب طیف دامنه فوریه شتاب افقی در بالاترین تراز ساختمان محفظه و سازه داخلی را تحت ارتعاشات افقی موج ریکر با دامنه‌ی 0.4g و فرکانس‌های ۴، ۶ و ۸ هرتز نشان می‌دهند. نتایج حاکی از آن است که شتاب افقی ایجادشده در سازه داخلی بیشتر از ساختمان محفظه است. همچنین در هر دو سازه، با افزایش فرکانس تحریک، مقدار شتاب افقی کاهش یافته است. مدل‌سازی اختلاط عمیق بلوکی (DSM) با ضخامت ۱۸ متر در زیر فونداسیون به ضخامت ۸ متر موجب افزایش شتاب افقی در هر دو سازه گردیده است، هرچند این افزایش در سازه داخلی اندکی محسوس‌تر می‌باشد. برای فرکانس تحریک موج ریکر ۴ هرتز، بیشترین تأثیر اختلاط عمیق بلوکی (DSM) بر افزایش شتاب افقی مشاهده شد. در سازه محفظه، دامنه شتاب افقی در بازه فرکانسی ۱/۵ تا ۵ هرتز به طور میانگین حدود ۲۵٪ افزایش یافت، در حالی که در سازه داخلی افزایش شتاب افقی در بازه ۰/۵ تا ۵ هرتز تقریباً ۴۰/۲٪ بود. این اختلاف شتاب بین سازه‌ها می‌تواند منجر به ایجاد تنش‌های اضافی و اثرات نامطلوب بر لوله‌ها، اتصالات و تجهیزات حساس در رآکتور شود، که اهمیت دقیق تحلیل پاسخ لرزه‌ای و طراحی مناسب DSM برای کاهش این اثرات را برجسته می‌کند.



(الف)

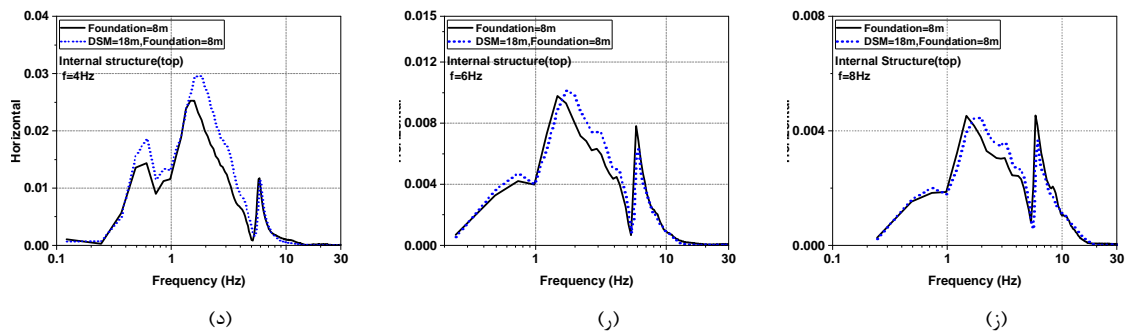


(ب)



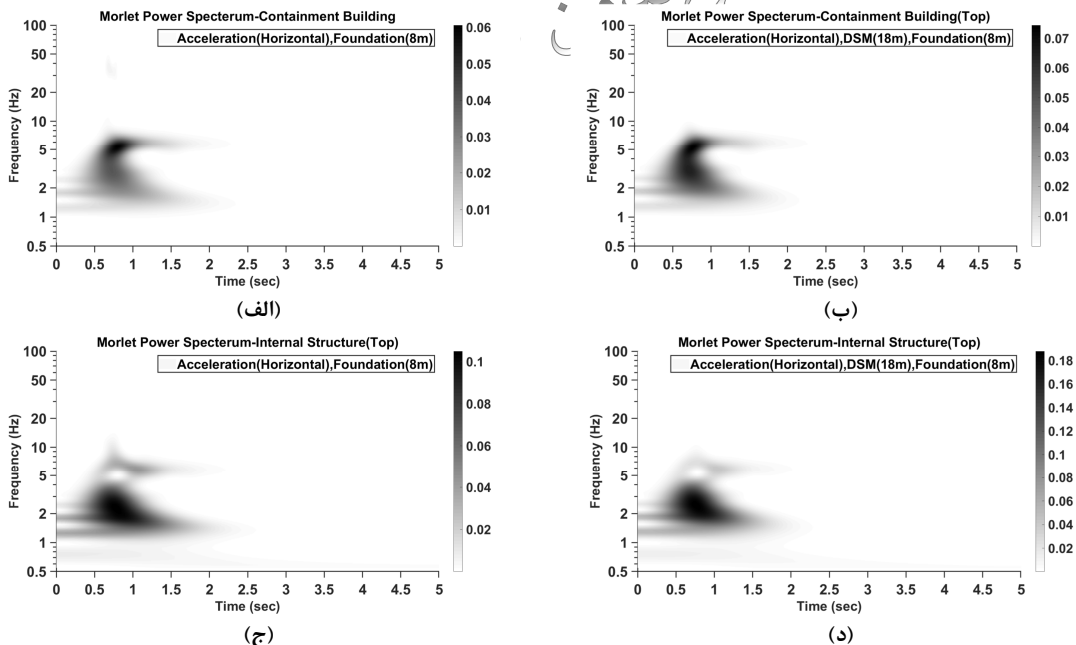
(ج)

این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می باشد. لطفاً برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.



شکل ۱۰: شتاب افقی ایجاد شده در تراز بالای سازه داخلی و ساختمان محفظه تحت بارگذاری یک‌جهته موجک ریکر با فرکانس‌های ۰.۴ g و ۴، ۶، ۸ Hz

در شکل ۱۱، طیف توان مورلت مربوط به شتاب افقی در بالاترین تراز ساختمان محفظه و سازه داخلی، تحت ارتعاشات افقی ناشی از موجک ریکر با دامنه ۰.۴ g و فرکانس ۴ Hz، برای دو حالت وجود و عدم وجود لایه اختلاط عمیق خاک ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که در هر دو بخش سازه، مدل‌سازی اختلاط عمیق بلوکی در زیر فونداسیون موجب افزایش انرژی شتاب افقی در تراز فوقانی سازه گردیده است. همچنین، در هر دو سازه مشاهده شد که حضور لایه‌ی اصلاح‌شده به روش اختلاط عمیق، تأثیری بر زمان تمرکز انرژی شتاب نداشته است. با این حال، بر اساس نتایج ارائه‌شده در شکل ۱۱-پ، وجود این لایه باعث تمرکز انرژی در فرکانس‌های پایین‌تر به‌ویژه در ساختمان محفظه شده است.

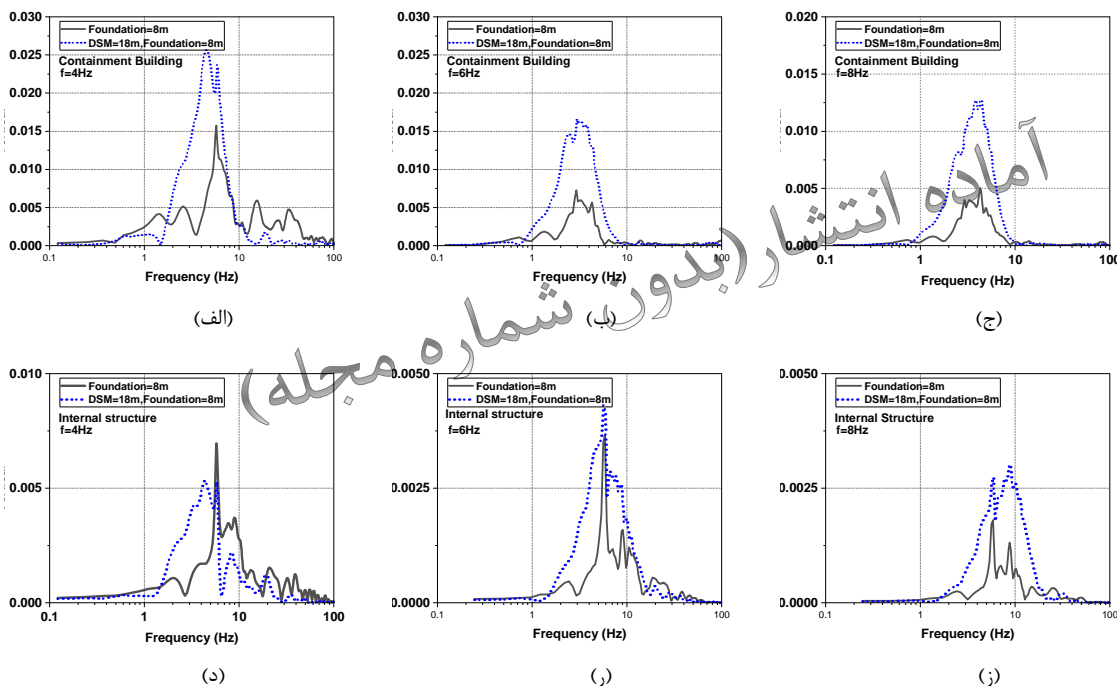


شکل ۱۱: طیف توان مورلت شتاب افقی در بالاترین تراز ساختمان محفظه و سازه داخلی تحت بارگذاری موج ریکر با دامنه ۰.۴ g و فرکانس ۴ Hz

شکل‌های ۱۲ طیف دامنه فوریه شتاب قائم ناشی از حرکت گهواره‌ای را به ترتیب در ساختمان محفظه و سازه داخلی نشان می‌دهند. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش فرکانس موج تحریک، شتاب قائم در هر دو سازه کاهش می‌یابد. با

این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می باشد. لطفا برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

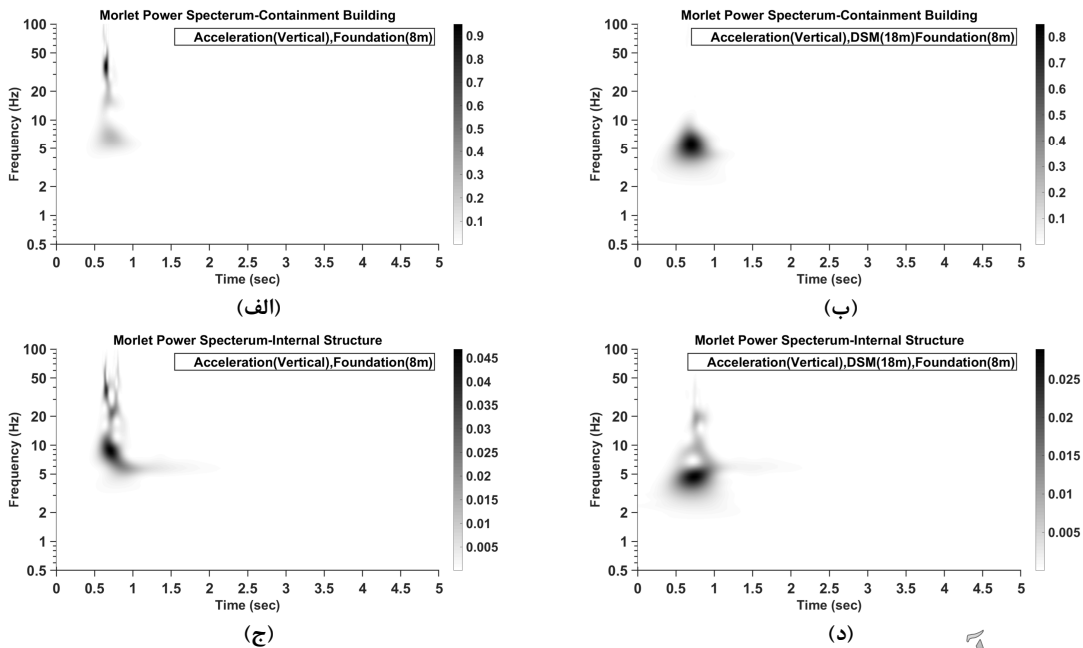
توجه به جای گیری ساختمان محفظه در لبه انتهایی فونداسیون و قرارگیری سازه داخلی نزدیک مرکز آن، شتاب قائم وارد شده به ساختمان محفظه به طور قابل توجهی بیشتر است. افزودن بلوک خاک اصلاح شده زیر فونداسیون موجب تقویت حرکت گهواره‌ای و افزایش شتاب قائم در سازه محفظه شد. این افزایش در بازه فرکانسی ۱ تا ۱۰ هرتز برای فرکانس‌های تحریک موج ریکر ۶ و ۸ هرتز و در بازه ۱/۵ تا ۷ هرتز برای فرکانس تحریک ۴ هرتز مشاهده شد. شدت افزایش با افزایش فرکانس موج تحریک محسوس تر گردید. به عنوان نمونه، برای فرکانس تحریک ۴ هرتز، میانگین افزایش دامنه شتاب قائم در بازه ۱/۵ تا ۷ هرتز حدود ۲۳۳٪ بود، در حالی که برای فرکانس‌های کمتر از ۱/۵ هرتز و بالاتر از ۷ هرتز، دامنه شتاب کاهش یافته است. در سازه داخلی نیز شتاب قائم با افزایش فرکانس کاهش یافته است، اما رفتار آن در حضور بلوک اختلاط عمیق بسته به فرکانس متفاوت بوده است. به طوری که در فرکانس‌های تحریک ۶ و ۸ هرتز، وجود خاک اصلاح شده موجب افزایش شتاب قائم در تمام بازه فرکانسی شده است، در حالی که در فرکانس‌های تحریک ۴ هرتز، ابتدا شتاب قائم تا فرکانس ۵ هرتز افزایش و سپس کاهش یافته است.



شکل ۱۲: شتاب قائم ایجاد شده در سازه داخلی و ساختمان محفظه تحت بارگذاری یک جهته موجک ریکر با فرکانس‌های 4, 6, 8 Hz و دامنه 0.4g

در شکل ۱۳، طیف توان مورلت مربوط به شتاب قائم در ساختمان محفظه و سازه داخلی، برای دو حالت وجود و عدم وجود لایه اختلاط عمیق بلوکی، تحت ارتعاش افقی ناشی از موجک ریکر با دامنه 0.4g و فرکانس 4 Hz ارائه شده است. نتایج حاکی از آن است که در ساختمان محفظه، تغییر قابل توجهی در زمان تمرکز انرژی و میزان انرژی شتاب قائم مشاهده نمی شود. با این حال، در سازه داخلی، مدل سازی لایه اختلاط عمیق خاک موجب کاهش انرژی شتاب قائم مطابق شکل ۱۳-د شده است، اما در عین حال تمرکز انرژی در بازه فرکانسی ۴ تا ۷ هرتز رخ داده است. این پدیده می تواند منجر به تحریک مودهای خاص ارتعاشی سازه و در نتیجه افزایش خطر آسیب به تجهیزات حساس نیروگاهی شود.

این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می‌باشد. لطفاً برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

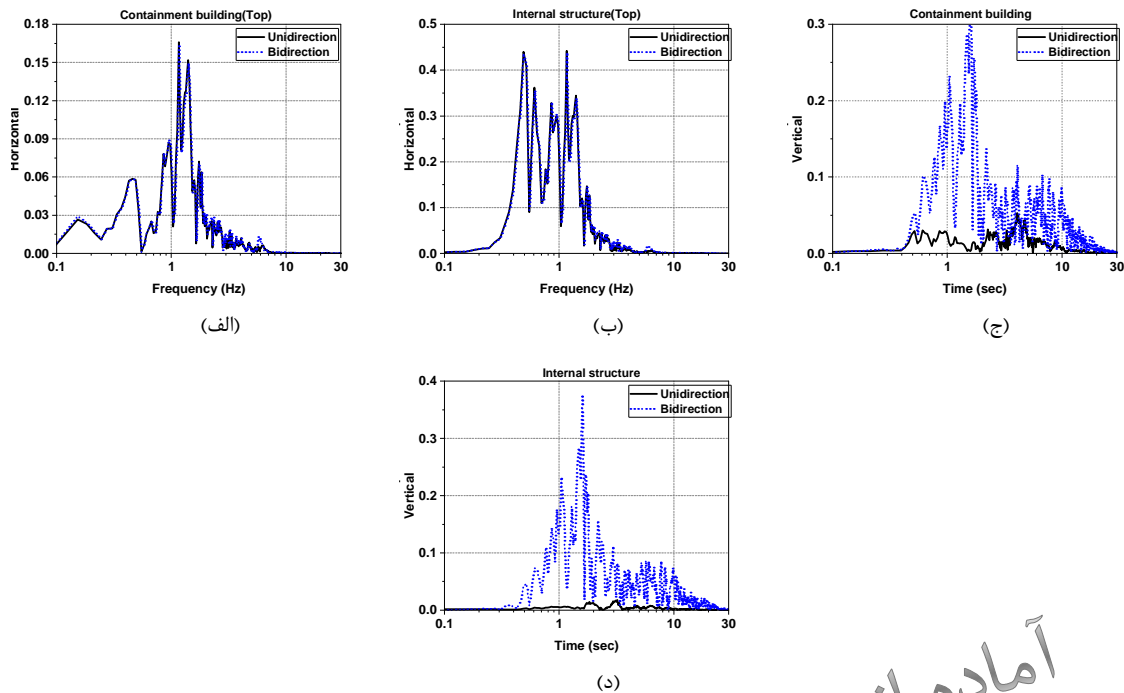


شکل ۱۳: طیف توان مورلت شتاب قائم در ساختمان محفظه و سازه داخلی تحت بارگذاری موج ریکر با دامنه $0.4 g$ و فرکانس $4 Hz$

مقایسه اثر بارگذاری یک جهته و دوجته بر رفتار لرزهای رآکتور

در سازه‌های نیروگاهی، به‌ویژه در ناحیه نزدیک گسل، زلزله‌ها معمولاً دارای مؤلفه‌های قوی در دو جهت افقی و گاهی مؤلفه قائم قابل توجه هستند. پدیده‌هایی مانند پالس سرعت باعث افزایش هم‌زمان تقاضای لرزهای در دو جهت می‌شوند و اگر اثر بارگذاری دوجته در تحلیل‌ها در نظر گرفته نشود، ممکن است پاسخ لرزهای سازه به‌درستی برآورد نشود و تجهیزات حساس دچار آسیب یا توقف عملکرد شوند. بنابراین استفاده از مدل‌های سه‌بعدی و اعمال هم‌زمان رکوردهای حوزه نزدیک برای ارزیابی رفتار واقعی سازه‌های نیروگاهی ضروری است. در این راستا، مدل اجزای محدود رآکتور APR1400 همراه با پروفیل خاک مربوطه تحت بارگذاری زلزله نزدیک‌گسل پارکفیلد (جدول ۶) تحلیل شده است. شکل ۱۴، طیف دامنه فوریه شتاب‌های افقی و قائم را برای دو بخش سازه داخلی و ساختمان محفظه در شرایط بارگذاری یک‌جهته و دوجته نشان می‌دهد. همان‌گونه که پیش‌تر اشاره شد، مؤلفه افقی شتاب زلزله پارکفیلد به $0.4g$ و مؤلفه قائم آن به دوسوم مقدار افقی ($0.27g$) مقیاس گردید. نتایج تحلیل نشان می‌دهد که بارگذاری دوجته تأثیر محسوسی بر دامنه‌ی شتاب افقی سازه داخلی و ساختمان محفظه نداشته است (شکل‌های ۱۴-الف، ۱۴-ب)، اما منجر به افزایش قابل توجه دامنه‌ی فوریه و انرژی شتاب قائم در تمامی بازه‌های فرکانسی شده است (شکل ۱۴-ج، ۱۴-د).

این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می‌باشد. لطفاً برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.



شکل ۱۴: طیف دامنه فوریه شتاب افقی و قائم ساختمان محفظه و سازه داخلی تحت بارگذاری یک‌جهته و دوجته زلزله حوزه نزدیک پارکفیلد^۱.

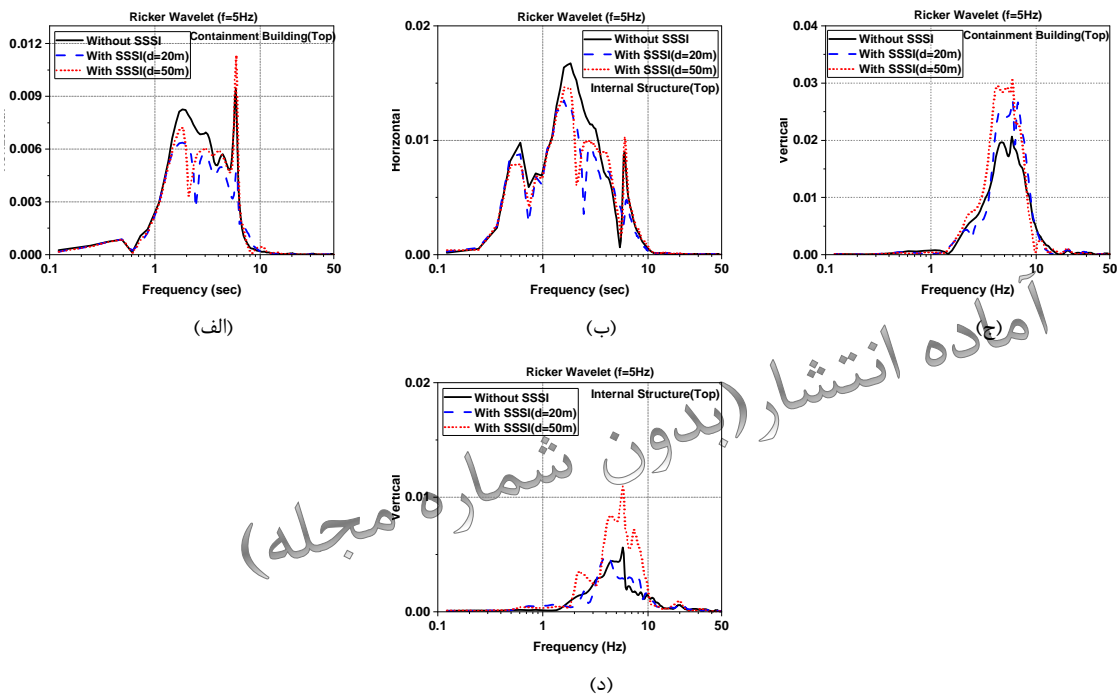
بررسی اثر اندرکنش سازه-خاک-سازه

در تحلیل لرزه‌های سازه‌های نیروگاهی، به‌خصوص رآکتورهای هسته‌ای، در نظر گرفتن انحراف سازه-خاک-سازه (SSSI) ضروری است، زیرا چندین سازه مجاور روی یک بستر خاکی مشترک قرار دارند و این امر باعث ایجاد اثرات دینامیکی پیچیده، تغییر توزیع میدان لرزه‌ای، تقویت یا تضعیف پاسخ، و ایجاد اختلاف فاز در ارتعاش سازه‌ها می‌شود. نادیده گرفتن SSSI می‌تواند باعث برآورد نادرست نیروها، نشست‌ها و جابه‌جایی‌های نسبی شود و عملکرد سامانه‌های ایمنی نیروگاه را به خطر بیندازد. برای بررسی این اثر، دو سازه APR1400 به‌صورت مدل جرم متمرکز روی فونداسیون و خاک اصلاح‌شده مدل‌سازی شدند. فونداسیون و ناحیه‌ی اصلاح‌شده با رفتار خطی و خاک زیرین با مدل الاستوپلاستیک دراکر-پراگر تحلیل شد. بارگذاری به‌صورت یک‌جهته با موجک ریکر با دامنه 0.4g و فرکانس 5Hz اعمال گردید و تحلیل برای دو فاصله بین سازه‌ها (۲۰ متر و ۵۰ متر) انجام شد. شکل ۱۵ طیف دامنه فوریه شتاب افقی در تراز بالای ساختمان محفظه و سازه داخلی و شتاب قائم را در هر دو سازه، برای سه حالت شامل: عدم وجود اندرکنش سازه-خاک-سازه (SSSI) و حضور سازه دوم در فواصل $R = 20\text{ m}$ و $R = 50\text{ m}$ ، نشان می‌دهد. نتایج حاکی از آن است که به‌طور کلی، وجود اثر SSSI منجر به کاهش کلی دامنه شتاب افقی در هر دو سازه شده است. با این حال، در فاصله $R = 50\text{ m}$ ، حضور سازه دوم باعث افزایش دامنه شتاب افقی در محدوده فرکانسی حدود 6Hz، هم در سازه داخلی و هم در ساختمان محفظه شده است (شکل‌های ۱۵-الف و ۱۵-ب). با توجه به وجود تجهیزات حساس و عمدتاً با محتوای فرکانسی بالا در ساختمان رآکتور، این افزایش موضعی دامنه شتاب، اهمیت بررسی دقیق

¹ Parkfield

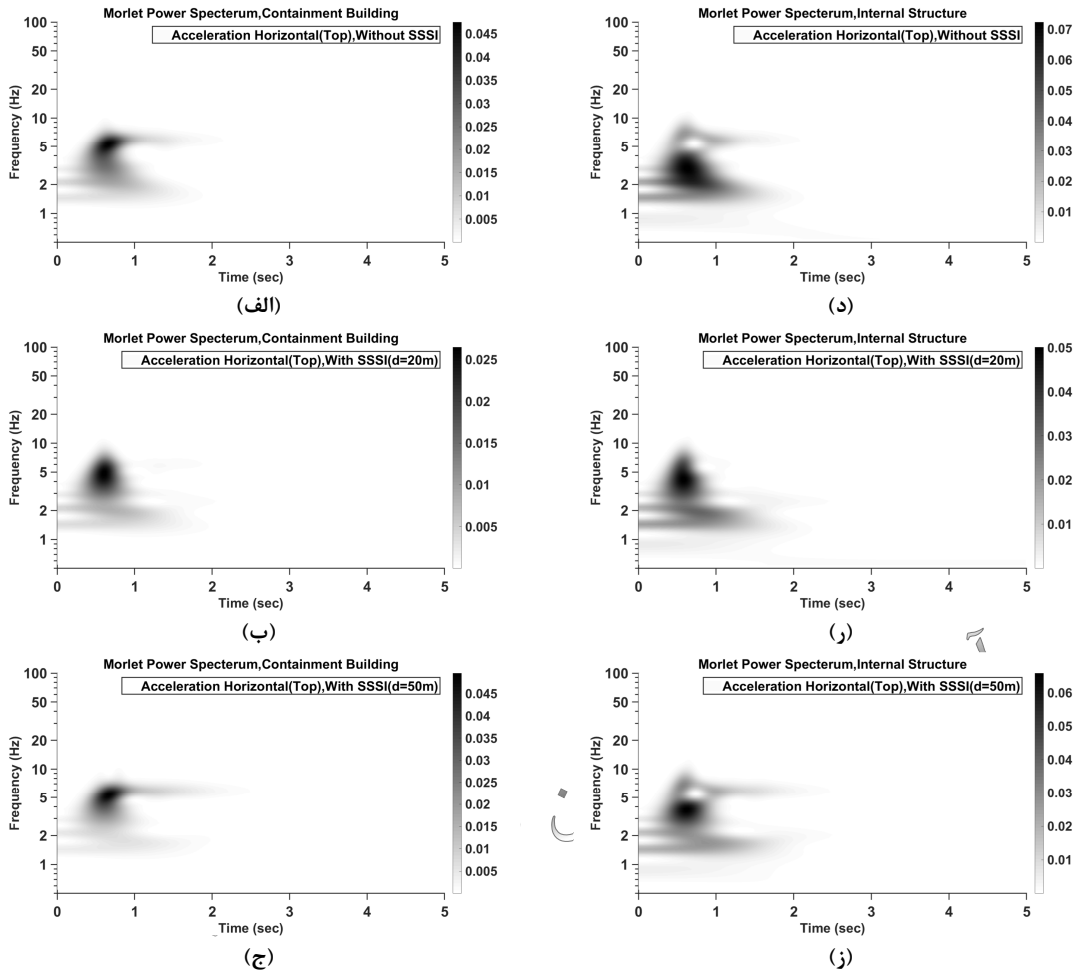
این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می‌باشد. لطفاً برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

اثر اندرکنش میان سازه‌های موجود در یک جزیره نیروگاهی را دوچندان می‌سازد. شکل ۱۵-ج و ۱۵-د، طیف دامنه فوریه شتاب قائم را با در نظر گرفتن اثر SSSI نشان می‌دهد. در ساختمان محفظه، حضور سازه دوم موجب افزایش دامنه شتاب قائم در طیف پاسخ شده است. این افزایش دامنه شتاب عمدتاً در بازه فرکانسی ۸-۲ هرتز مشاهده می‌شود و بیشینه آن در حالت $R = 50 \text{ m}$ رخ داده است. مدل‌سازی سازه‌ی دوم در فاصله‌ی ۲۰ متری، تأثیر متفاوتی بر شتاب قائم در سازه‌ی داخلی داشته است؛ به‌گونه‌ای که در برخی فرکانس‌ها دامنه شتاب قائم کاهش و در برخی دیگر افزایش یافته است. با افزایش فاصله‌ی رآکتور دوم به ۵۰ متر، دامنه شتاب قائم در بازه‌ی فرکانسی ۲ تا ۱۰ هرتز افزایش چشمگیری نشان می‌دهد.



شکل ۱۵: طیف دامنه فوریه شتاب افقی و قائم ساختمان محفظه و سازه داخلی با در نظر گرفتن اثر اندرکنش سازه-خاک-سازه. در شکل ۱۶، طیف توان مورلت شتاب افقی در بالاترین تراز ساختمان محفظه و سازه داخلی نشان داده شده است. در ساختمان محفظه (شکل ۱۶-الف تا ۱۶-ج)، مدل‌سازی رآکتور دوم در فاصله ۲۰ متری سبب کاهش انرژی شتاب شده است، اما با افزایش فاصله تا ۵۰ متر، سطح انرژی شتاب مجدداً به حالت بدون وجود سازه دوم بازگشته است. در هر دو حالت وجود سازه در فاصله‌های ۲۰ و ۵۰ متر، اندکی تمرکز انرژی در بازه فرکانسی محدودتری مشاهده می‌شود. در سازه داخلی (شکل ۱۶-د تا ۱۶-ز)، مدل‌سازی رآکتور دوم در فاصله‌های ۲۰ و ۵۰ متری موجب کاهش انرژی شتاب افقی در تراز بالای سازه نسبت به حالت بدون وجود سازه دوم شده است. در هر دو ساختمان محفظه و سازه داخلی، اثر اندرکنش سازه-خاک-سازه تأثیر قابل‌ملاحظه‌ای بر زمان تمرکز انرژی نداشته است.

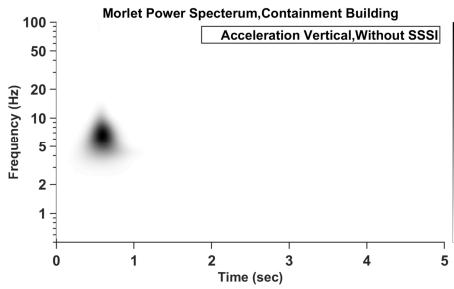
این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می باشد. لطفاً برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.



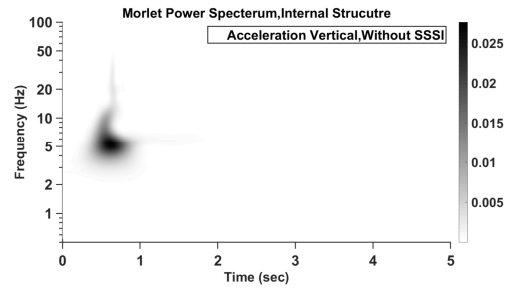
شکل ۱۶: طیف توان مورلت شتاب افقی در بالاترین تراز ساختمان محفظه و سازه داخلی با در نظر گرفتن SSSI.

در شکل ۱۷، طیف توان مورلت شتاب قائم در ساختمان محفظه و سازه داخلی با و بدون در نظر گرفتن اثر اندرکنش سازه-خاک-سازه نشان داده شده است. در ساختمان محفظه (شکل ۱۷-الف تا ۱۷-ج)، وجود رآکتور دوم در دو فاصله ۲۰ و ۵۰ متری موجب افزایش انرژی شتاب شده است، اما تغییر محسوسی در زمان و بازه‌ی فرکانسی تمرکز انرژی مشاهده نمی‌شود. مطابق شکل ۱۷-د تا ۱۷-ز، در سازه داخلی وجود رآکتور دوم در فاصله‌ی ۲۰ متری باعث کاهش انرژی شتاب قائم شده، هرچند تمرکز انرژی در دو بازه‌ی فرکانسی مجزا رخ داده است. با افزایش فاصله‌ی رآکتور دوم به ۵۰ متر، انرژی شتاب قائم افزایش یافته است. در هر دو سازه، اثر اندرکنش سازه-خاک-سازه تأثیر قابل توجهی بر زمان تمرکز انرژی شتاب نداشته است.

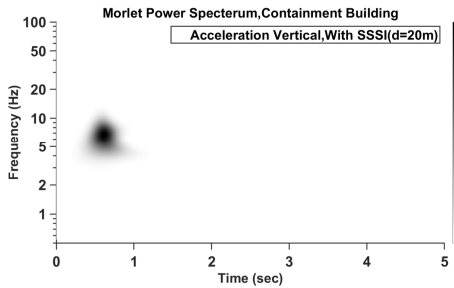
این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می باشد. لطفاً برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.



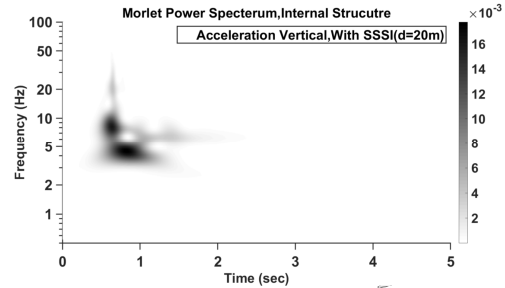
(الف)



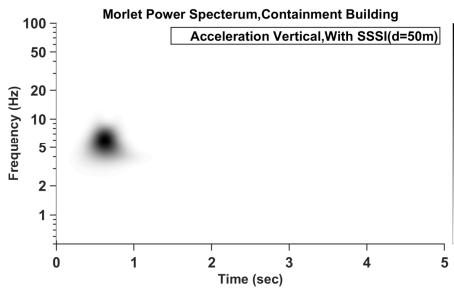
(د)



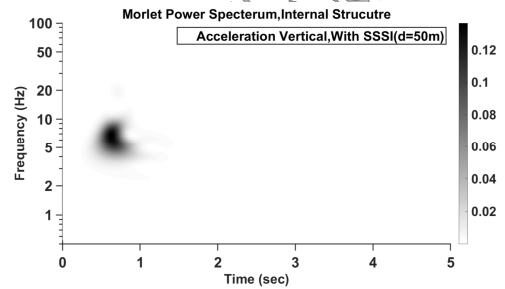
(ب)



(ر)



(ج)



(ز)

شکل ۱۷: طیف توان مورلت شتاب قائم ناشی از حرکت گهواره‌ای در ساختمان محفظه و سازه داخلی با در نظر گرفتن SSSI.

بررسی اثرات زیست‌محیطی روش اختلاط عمیق بلوکی در بهسازی خاک‌های مسئله‌دار

روش اختلاط عمیق بلوکی (DSM) علیرغم مزایای فنی و اقتصادی اثبات شده در بهسازی خاک‌های مسئله‌دار، همانند هر فناوری مهندسی دیگر دارای پیامدهای غیرقابل انکاری بر محیط زیست است. این اثرات در سه حیطه اصلی «تأثیر بر آب‌های زیرزمینی»، «مصرف انرژی و انتشار کربن» و «تولید پسماند و ضایعات ساختمانی» دسته‌بندی و بررسی می‌شوند.

* تأثیر بر آب‌های زیرزمینی

تأثیر استفاده از روش اختلاط عمیق بلوکی بر آب‌های زیرزمینی را می‌توان از دو جنبه مثبت و منفی بررسی کرد. اصلی‌ترین نگرانی مربوط به آب‌های زیرزمینی در اجرای اختلاط عمیق بلوکی، مکانیسم آیشویی^۱ فلزات سنگین و ترکیبات قلیایی از ستون‌های سیمانی تثبیت‌شده به درون لایه‌های آب زیرزمینی است که می‌تواند یکی از چالش‌های

¹ Leaching

این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می‌باشد. لطفاً برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

این روش به‌سازی خاک محسوب شود. مطالعات بر روی نمونه‌های تثبیت‌شده با سیمان پرتلند معمولی نشان داده است که اگرچه این فرآیند قادر به تثبیت و کاهش نفوذ بسیاری از آلاینده‌ها است، اما در برخی موارد خاص ممکن است منجر به افزایش جزئی غلظت عناصری همچون آرسنیک (As)، کروم (Cr) و مس (Cu) در زهاب خروجی گردد (سارکینن^۱ و همکاران ۲۰۲۴). با این وجود، از منظر مهندسی محیط زیست، روش اختلاط عمیق بلوکی در بسیاری از موارد نه یک عامل آلاینده، بلکه راهکاری مؤثر برای مهار آلودگی محسوب می‌شود. واکنش مواد افزودنی با رطوبت و کانی‌های خاک، محصولی به نام «خاک-سیمان» با تخلخل و نفوذپذیری بسیار پایین تولید می‌کند که قادر است آلاینده‌های موجود در خاک را در خود محصور کرده و از حرکت آن‌ها توسط آب‌های زیرزمینی جلوگیری نماید (تثبیت/جامدسازی). این فناوری در پروژه‌های متعدد پاک‌سازی^۲ برای غیرفعال‌سازی آلاینده‌های آلی و معدنی در محل^۳ با موفقیت به کار رفته است. علاوه بر این، روش اختلاط عمیق گزینه‌ای مناسب برای اجرا در بستر دپوی زباله‌های شهری است، زیرا ایجاد بلوک با مقاومت بالا و نفوذپذیری کم در زیر دپوی زباله سبب کاهش نفوذ شیرابه به درون زمین و آب‌های زیرزمینی می‌گردد (کیتازومه^۴ و همکاران ۲۰۱۳).

* ردپای کربن و مصرف انرژی

تحقیقات جامع تحلیل چرخه حیات برای روش اختلاط عمیق نشان می‌دهد که سیمان مصرفی، بزرگ‌ترین منبع انتشار گازهای گلخانه‌ای در این فناوری است. بر اساس مطالعه موردی منتشر شده توسط انتشار کربن ناشی از مصرف سیمان سهمی بالغ بر ۹۵/۶۴ درصد از کل انتشار ناخالص پروژه‌های اختلاط عمیق را به خود اختصاص می‌دهد. مطالعات جدیدتر، انرژی مصرفی تجهیزات حفاری و اختلاط و همچنین سوخت حمل‌ونقل را نیز در محاسبات منظور کرده‌اند. مدل‌سازی‌ها نشان می‌دهد که رویکرد داخلی‌سازی فناوری و کاهش فواصل حمل در زنجیره تأمین، تأثیر مستقیمی بر کاهش ردپای کربن دارد. برای کاهش انتشار، تحقیقات گسترده‌ای بر روی سیمان‌های کم کربن و استفاده از پسماندهای صنعتی متمرکز شده است. نتایج ارزیابی چرخه حیات برای دوغاب حاوی سیمان نشان می‌دهد که این روش قادر است انتشار CO₂ را تا ۸۵ درصد نسبت به روش جابجایی انبوه خاک^۵ ۷۷ درصد نسبت به شمع‌گذاری کاهش دهد (ماخ^۶ و همکاران).

* مدیریت پسماند و ضایعات ساختمانی

عملیات به‌سازی خاک به روش بر خلاف روش جابجایی انبوه خاک، منجر به تولید زباله صفر می‌شود. در این روش، خاک بکر در محل با مواد افزودنی ترکیب می‌گردد و نیازی به حفاری، بارگیری و حمل خاک آلوده یا نرم به خارج از سایت و تخلیه آن در محیط‌های دیگر نیست، که این خود از بسیاری از آلودگی‌های ثانویه جلوگیری می‌کند. در برخی روش‌های اجرایی ممکن است دوغاب اضافی یا جاری‌شده در سطح زمین باقی بماند که این پسماند سیال باید به گونه‌ای مدیریت شود که وارد شبکه زهکشی طبیعی نگردد. بهترین روش‌های مدیریت زیست‌محیطی شامل جمع‌آوری، جداسازی و در صورت امکان استفاده مجدد از این مواد به عنوان مصالح پرکننده یا اصلاح‌کننده خاک در سایر نواحی پروژه است.

¹ Sarkkinen

² Remediation

³ In-situ

⁴ Kitazume

⁵ Mass Exchange

⁶ Mach

این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می‌باشد. لطفاً برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که پاسخ لرزه‌ای سازه رآکتور APR1400 به‌طور معناداری تحت تأثیر اصلاح بستر به روش اختلاط عمیق بلوکی (DSM) و نیز اندرکنش سازه-خاک-سازه قرار می‌گیرد. افزایش شتاب‌های افقی در سازه داخلی و تشدید شتاب‌های قائم ناشی از حرکت گهواره‌ای، به‌ویژه در بازه‌های فرکانسی ۲ تا ۱۰ هرتز، بیانگر تمرکز و بازتوزیع انرژی لرزه‌ای در محدوده‌های است که با محدوده عملکرد بسیاری از تجهیزات حساس و سامانه‌های ایمنی نیروگاهی هم‌پوشانی دارد. چنین افزایشی می‌تواند موجب تشدید تنش در اتصالات، تجهیزات الکترومکانیکی، سامانه‌های خنک‌کننده و خطوط لوله گردد و احتمال خرابی عملکردی را افزایش دهد، حتی در شرایطی که سازه اصلی در محدوده الاستیک باقی بماند. تحلیل بارگذاری دوجهته نشان داد که اگرچه تغییر محسوسی در شتاب افقی ایجاد نشد، اما انرژی و دامنه فوریه شتاب قائم به‌طور چشمگیری افزایش یافت. از آنجا که تحریک قائم در بسیاری از آیین‌نامه‌های طراحی با ضرایب کاهش در نظر گرفته می‌شود، نادیده گرفتن این تشدید می‌تواند منجر به کم‌برآوردی تقاضای لرزه‌ای واقعی گردد. این موضوع در سازه‌های هسته‌ای که وابستگی عملکرد ایمن آن‌ها به تجهیزات داخلی و پیوستگی سامانه‌های ایمنی است، اهمیت مضاعف دارد. همچنین مشاهده شد که اندرکنش سازه-خاک-سازه در فواصل مشخص (به‌ویژه ۵۰ متر) می‌تواند موجب تقویت موضعی پاسخ در بازه‌های فرکانسی بحرانی شود. در سایت‌های چندواحدی نیروگاهی، این پدیده ممکن است منجر به انتقال انرژی و تشدید پاسخ در یک واحد به واسطه عملکرد دینامیکی واحد مجاور گردد، امری که در طراحی سنتی غالباً به‌صورت مستقل در نظر گرفته می‌شود. تجربه حوادثی نظیر سانحه نیروگاه هسته‌ای فوکوشیما دایچی^۱ پس از زلزله و سونامی توهوکو^۲ نشان داد که ارزیابی ناکافی رفتار لرزه‌ای و برهم‌کنش‌های محیطی می‌تواند به اختلال زنجیره‌ای سامانه‌های ایمنی و بروز پیامدهای گسترده انسانی و زیست‌محیطی منجر شود. بر این اساس، یافته‌های این پژوهش تأکید می‌کند که مدل‌سازی واقع‌بینانه اندرکنش خاک-سازه، اعمال هم‌زمان مؤلفه‌های افقی و قائم و بررسی اثر فاصله بین سازه‌ها، نه تنها یک ضرورت تحلیلی بلکه بخشی اساسی از راهبرد کاهش ریسک مخاطرات طبیعی در نیروگاه‌های هسته‌ای محسوب می‌شود. بی‌توجهی به این عوامل می‌تواند منجر به برآورد غیرمحافظة کارانه تقاضای لرزه‌ای و کاهش حاشیه ایمنی سامانه‌های حیاتی گردد.

منابع

- Anderson, L. M., Carey, S., & Amin, J. (2012). Effect of Structure, Soil, and Ground Motion Parameters on Structure-Soil-Structure Interaction of Large-Scale Nuclear Structures. In *Structures Congress 2011* (pp. 2862-2873). [https://doi.org/doi:10.1061/41171\(401\)249](https://doi.org/doi:10.1061/41171(401)249)
- Bolisetti, C., Whittaker, A. S., & Coleman, J. L. (2018). Linear and nonlinear soil-structure interaction analysis of buildings and safety-related nuclear structures. *Soil dynamics and earthquake engineering*, 107, 218-233. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2018.01.026>
- Çetindemir, O., & Zülfikar, A. C. (2024). Numerical validation of fully coupled nonlinear seismic soil-pile-structure interaction. *Buildings*, 14(6), 1502.
- Clouteau, D., Broc, D., Devésá, G., Guyonvarh, V., & Massin, P. (2012). Calculation methods of Structure-Soil-Structure Interaction (3SI) for embedded buildings: Application to NUPEC tests. *Soil dynamics and earthquake engineering*, 32(1), 129-142. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2011.08.005>
- Engineers, A. S. o. C. (2017). Seismic analysis of safety-related nuclear structures.

¹ Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant

² Tohoku earthquake and tsunami

- Hasegawa, K. (2012). Facing nuclear risks: Lessons from the Fukushima nuclear disaster. *International Journal of Japanese Sociology*, 21(1), 84-91.
- Islam, M. R., Turja, S. D., Van Nguyen, D., Forcellini, D., & Kim, D. (2024). Seismic soil-structure interaction in nuclear power plants: An extensive review. *Results in Engineering*, 23, 102694. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102694>
- Jeremić, B., Jie, G., Preisig, M., & Tafazzoli, N. (2009). Time domain simulation of soil–foundation–structure interaction in non-uniform soils. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 38(5), 699-718.
- Kanellopoulos, C., Rangelow, P., Jeremic, B., Anastasopoulos, I., & Stojadinovic, B. (2024). Dynamic structure-soil-structure interaction for nuclear power plants. *Soil dynamics and earthquake engineering*, 181, 108631. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2024.108631>
- Kitada, Y., Hirofani, T., & Iguchi, M. (1999). Models test on the dynamic structure–structure interaction of nuclear power plant buildings. *Nuclear Engineering and Design*, 192(2-3), 205-216.
- Kitazume, M., & Terashi, M. (2013). The deep mixing method. CRC Press.
- Lee, T. H., & Wesley, D. A. (1973). Soil-structure interaction of nuclear reactor structures is considered through-soil coupling between adjacent structures. *Nuclear Engineering and Design*, 24(3), 374-387. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0029-5493\(73\)90007-1](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0029-5493(73)90007-1)
- Mach, A., & Szczygielski, M. (2024). Carbon footprint analysis throughout the life cycle of the continuous deep mixing method (CDMM) technology. *Energies*, 17(13), 3294.
- Mazzoni, S., McKenna, F., Scott, M. H., & Fenves, G. L. (2006). Open system for earthquake engineering simulation user command-language manual. *Report NEES grid-TR 2004*, 21.
- Methodologies for Seismic Soil–Structure Interaction Analysis in the Design and Assessment of Nuclear Installations*. (2022). INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. <https://www.iaea.org/publications/15051/methodologies-for-seismic-soil-structure-interaction-analysis-in-the-design-and-assessment-of-nuclear-installations>
- Nielsen, A. H. (2006). Absorbing boundary conditions for seismic analysis in ABAQUS. ABAQUS users' conference, Phillips, C., Hashash, Y. M., Olson, S. M., & Muszynski, M. R. (2012). Significance of small-strain damping and dilation parameters in numerical modeling of free-field lateral spreading centrifuge tests. *Soil dynamics and earthquake engineering*, 42, 161-176. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2012.06.001>
- Ribó, R., Pasenau, M., Escolano, E., Ronda, J., & González, L. (1998). GiD reference manual. *CIMNE, Barcelona*, 27, 25.
- Roy, C., Bolourchi, S., & Eggers, D. (2015). Significance of structure–soil–structure interaction for closely spaced structures. *Nuclear Engineering and Design*, 295, 680-687. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2015.07.067>
- Sarkinen, M., Koskinen, J., Silmu, R., Viitikko, K., & Saari, K. Deep Stabilization of Soft Clay Soil with a Low-Co₂ Binder Generated from Waste Streams of Pulp and Paper Mills. Available at SSRN 4868084.
- Shaghghi, M. M., Kani, I. M., & Yousefi, H. (2021). The Seismic Behavior of Block-Type Deep Soil Mixing. *Latin American Journal of Solids and Structures*, 18.
- Van Nguyen, D., Kim, D., & Duy Nguyen, D. (2020). Nonlinear seismic soil-structure interaction analysis of nuclear reactor building considering the effect of earthquake frequency content. *Structures*, 26, 901-914. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.05.013>
- Wada, T., Nemoto, Y., Shimamura, S., Fujita, T., Mizuno, T., Sohtome, T., Kamiyama, K., Morita, T., & Igarashi, S. (2013). Effects of the nuclear disaster on marine products in Fukushima. *Journal of Environmental Radioactivity*, 124, 246-254. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2013.05.008>
- Wang, X., Zhou, Q., Zhu, K., Shi, L., Li, X., & Wang, H. (2017). Analysis of seismic soil-structure interaction for a nuclear power plant (HTR-10). *Science and Technology of Nuclear Installations*, 2017. [https://doi.org/10.1155/2017/2358403Digital Object Identifier \(DOI\)](https://doi.org/10.1155/2017/2358403Digital Object Identifier (DOI))
- Yaghfoori, A., Mahmoudzadeh Kani, I., & Yousefi, H. (2025a). Seismic behavior of dry sandy soils improved with Block-Type Deep Soil Mixing in near-fault regions. *AUT Journal of Civil Engineering*. [10.22060/ajce.2025.24157.5923](https://doi.org/10.22060/ajce.2025.24157.5923)
- Yaghfoori, A., Mahmoudzadeh Kani, I., & Yousefi, H. (2025b). Seismic performance and optimization of deep soil mixing (DSM) for response mitigation at power plant sites. *Engineering Computations*, 41(8), 1-42.
- Yaghfoori, A., Mahmoudzadeh Kani, I., & Yousefi, H. (2026). Seismic Response and Uncertainty Quantification of Deep Soil Mixing-Improved Nevada Sand Under Unidirectional and Bidirectional Loading. *Transportation Infrastructure Geotechnology*, 13(2), 28. <https://doi.org/10.1007/s40515-026-00789-8>
- Yaghfoori A, Mahmoudzadeh Kani I, Yousefi H. Impact of geotechnical and seismic uncertainties on the seismic performance of DSM-improved nuclear reactor foundations considering soil–structure interaction. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*. 2026;30(1):2604295. <https://doi.org/10.1080/19648189.2025.2604295>
- Yue, D., Ghiocel, D. M., Fuyama, H., Ogata, T., & Stark, G. (2013). Structure-soil-structure interaction effects for two heavy NPP buildings with large-size embedded foundations. *SMIRT22 Proceedings*, 18-23.