J. of Marine Eng. Vol. 22, Iss. 49, 2026. (50-58)

Journal of Marine Engineering

Journal homepage: marine-eng.ir

Seismic analysis of caisson breakwaters (compound breakwaters) due to far-field and near-field earthquakes

Babak Khammari sani[1], Amin Bahman pour[2*] Mohammad Asadian Ghafarokhi[3] Farhoud Azarsina[4]

[1]*Ph.D. student, Faculty of Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran; babak.khamar@gmail.com*
[2]*Assistant Professor, Faculty of Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran; aminbahmanpour@srbiau.ac.ir*
[3]*Assistant Professor, Faculty of Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran; asadian@srbiau.ac.ir*
[4]*Assistant Professor, Faculty of Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran; f.azarsina@srbiau.ac.ir*

ARTICLE INFO

Article History:
Received: 17 Jun 2026
Last modification: 23 Aug 2026
Accepted: 23 Aug 2026
Available online: 24 Aug 2026

Article type:
Research paper

Keywords:
Composite Caisson Breakwater
Near-field Earthquake Far-field Earthquake Nonlinear Dynamic Analysis Time History Resonance Performance-Based Design

ABSTRACT

Caisson breakwaters are critical port structures with high seismic sensitivity arising from soil–structure–water interaction and nonlinear material behaviour. This study presents a comparative evaluation of their response under near-field and far-field earthquake excitations, with emphasis on caisson height, underlying soil thickness and stiffness, and fault mechanism. Nonlinear dynamic time-history analyses were performed in PLAXIS 2D using the Hardening Soil constitutive model. Three representative earthquake records were applied at both near- and far-field distances. The results demonstrate that near-field motions increase residual horizontal displacement by several times relative to far-field records, primarily because of velocity pulses and frequency content overlap with the system natural frequency (particularly on stiff soil). Reducing caisson height from 20 m to 10 m on soft soil decreases final residual displacement by up to 63 % (from 0.2 m to 0.1 m). On stiff soil, resonance in the 16–25 Hz band produces sustained amplification of crest acceleration. According to PIANC performance criteria, short caissons remain within the serviceable range, whereas tall caissons on soft soil approach the near-collapse limit. Even in the far field, the Bam earthquake poses a comparable threat due to its rich low-frequency content. Reducing caisson height and improving the foundation soil are identified as the most effective measures for enhancing seismic performance. This work provides a systematic numerical parametric study that quantifies the combined influence of key geometric and geotechnical parameters and identifies reduction of caisson height and foundation improvement as the most effective measures within the investigated parameter space.

ISSN: 2645-8136

DOI:

Copyright: © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license [https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/]

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-23]

نشریه مهندسی دریا، جلد ۲۲، شماره ۴۹، ۱۴۰۵، (۵۸-۵۰)

نشریه مهندسی دریا

صفحه اصلی نشریه: marine-eng.ir

تحلیل لرزه‌ای موج شکن های کیسونی (موج شکن های مرکب) در اثر زلزله های میدان دور و میدان نزدیک

بابک خمری ثانی[۱]، امین بهمن پور[۲*]، محمد اسدیان قهفرخی[۳]، فرهود آذرسینا[۴]

[۱] دانشجوی دکتری تخصصی ، دانشکده فنی و مهندسی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، babak.khamar@gmail.com

[۲] استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی ، تهران، aminbahmanpour@srbiau.ac.ir

[۳] استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی ، تهران، asadian@srbiau.ac.ir

[۴] استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی ، تهران، f.azarsina@srbiau.ac.ir

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۵/۰۳/۲۷

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۴۰۵/۰۶/۰۱

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۵/۰۶/۰۱

تاریخ انتشار مقاله: ۱۴۰۵/۰۶/۰۲

نوع مقاله:

مقاله پژوهشی

کلمات کلیدی:

موج‌شکن کیسونی مرکب

زلزله حوزه نزدیک

زلزله حوزه دور

تحلیل دینامیکی غیرخطی تاریخچه‌زمانی

رزونانس

طراحی مبتنی بر عملکرد

چکیده

موج‌شکن‌های کیسونی مرکب از سازه‌های حیاتی بنادر هستند که به‌دلیل اندرکنش خاک،سازه،آب و رفتار غیرخطی مصالح، حساسیت لرزه‌ای بالایی دارند. هدف این پژوهش ارزیابی مقایسه‌ای رفتار این سازه‌ها تحت زلزله‌های حوزه نزدیک و دور با تأکید بر ارتفاع کیسون، ضخامت و سختی خاک زیرین و مکانیزم گسل است. تحلیل دینامیکی غیرخطی تاریخچه‌زمانی با استفاده از نرم‌افزار PLAXIS 2D و مدل Hardening Soil انجام شد. سه زلزله شاخص در دو فاصله نزدیک و دور از گسل اعمال گردید. نتایج نشان می‌دهد زلزله‌های حوزه نزدیک به‌دلیل وجود پالس‌های سرعت و همپوشانی فرکانسی با فرکانس طبیعی سیستم (به‌ویژه در خاک سفت)، جابجایی افقی باقی‌مانده را تا چندین برابر زلزله‌های حوزه دور افزایش می‌دهند. کاهش ارتفاع کیسون از ۲۰ به ۱۰ متر در خاک نرم، جابجایی نهایی را تا ۶۳ درصد (از ۰.۲ متر به ۰.۱ متر) کاهش می‌دهد. در خاک سفت، پدیده رزونانس در محدوده ۱۶–۲۵ هرتز باعث تشدید پایدار نوسانات و افزایش شدید شتاب تاج می‌شود. بر اساس معیارهای بین‌المللیPIANC، کیسون‌های کوتاه در محدوده عملکرد قابل‌سرویس با جابجایی ناچیز قرار می‌گیرند، در حالی که کیسون‌های بلند در خاک نرم به مرز فروریزش نزدیک می‌شوند. در حوزه دور، زلزله بم با محتوای فرکانسی پایین تهدیدی قابل‌مقایسه با زلزله‌های نزدیک ایجاد می‌کند. این مطالعه به‌صورت یک بررسی پارامتری عددی نظام‌مند، اثر همزمان چند پارامتر کلیدی را کمی‌سازی کرده و کاهش ارتفاع کیسون و بهسازی ژئوتکنیکی خاک را به‌عنوان مؤثرترین راهکارهای بهبود عملکرد لرزه‌ای در دامنه پارامترهای بررسی‌شده پیشنهاد می‌کند.

ISSN: 2645-8136

DOI:

حق نشر: © ۲۰۲۶ توسط نویسندگان. این اثر برای انتشار با دسترسی آزاد، تحت شرایط و ضوابط مجوز (CC BY)ارسال شده است.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-23]

۱ - مقدمه

سازه‌های دریایی، به‌ویژه موج‌شکن‌های کیسونی مرکب، نقش حیاتی در ایمنی و عملکرد بنادر و تأسیسات ساحلی ایفا می‌کنند. این سازه‌ها که از ترکیب کیسون بتنی و پایه توده‌سنگی تشکیل شده‌اند، به‌دلیل پیچیدگی رفتاری و حساسیت به بارهای دینامیکی نیازمند ارزیابی دقیق لرزه‌ای هستند. موقعیت ایران در کمربند لرزه‌خیز آلپ–هیمالیا و وجود بنادر متعدد در سواحل شمالی و جنوبی، اهمیت مطالعه پاسخ لرزه‌ای این سازه‌ها را برجسته می‌سازد[1].

موج‌شکن‌ها از مهم‌ترین سازه‌های دریایی در بندرسازی محسوب می‌شوند و هزینه احداث آن‌ها نسبت به سایر سازه‌های ساحلی قابل‌توجه است؛ ازاین‌رو بهینه‌سازی ابعاد آن‌ها همواره دغدغه مهندسان بوده است. استفاده از موج‌شکن مرکب تعادل میان هزینه‌های احداث کیسون و پایه توده‌سنگی را برقرار می‌کند و به صرفه‌جویی در هزینه‌های اجرا می‌انجامد[2] .

تجربیات زلزله‌های گذشته نشان داده است که موج‌شکن‌های کیسونی در برابر حرکات قوی زمین، به‌ویژه در حوزه نزدیک گسل، آسیب‌پذیری قابل‌توجهی دارند. زلزله ۱۹۹۵ هانشین در ژاپن باعث تخریب گسترده موج‌شکن بندر کوبه شد؛ خرابی‌ها عمدتاً ناشی از نشست سازه در اثر تغییرشکل‌های زیاد لایه‌های سست زیرین بود [۴]. زلزله بم ۲۰۰۳ در ایران و رویدادهای مشابه نیز نشان دادند که طراحی سنتی مبتنی بر نیروهای استاتیکی معادل برای مقابله با پدیده‌هایی مانند رزونانس و روان‌گرایی کافی نیست[5,6].

مطالعات متعددی در زمینه رفتار لرزه‌ای سازه‌های دریایی انجام شده است. با این حال، بررسی ادبیات نشان می‌دهد که مطالعه جامعی که به‌طور همزمان اثر زلزله‌های حوزه نزدیک و دور با مکانیزم‌های مختلف گسل را بر روی طیف کاملی از پارامترهای ژئوتکنیکی و هندسی بررسی کرده باشد، کمتر انجام شده است [۷–۱۲]. با این حال، بررسی همزمان اثر زلزله‌های حوزه نزدیک و دور همراه با پارامترهای هندسی و ژئوتکنیکی در قالب یک مطالعه پارامتری منسجم همچنان ارزش کاربردی دارد[8,10,11] .

با وجود پژوهش‌های گسترده، خلأ تحقیقاتی قابل‌توجهی در تحلیل همزمان اثر زلزله‌های حوزه نزدیک و دور با مکانیزم‌های مختلف گسل (معکوس و امتدادلغز)، طیف کاملی از پارامترهای ژئوتکنیکی (سختی و ضخامت خاک) و هندسی (ارتفاع کیسون) وجود دارد. همچنین شناسایی کمی فرکانس‌های بحرانی سیستم و ارائه راهکارهای طراحی مبتنی بر عملکرد با استناد به معیارهای بین‌المللی PIANC و OCDI کمتر مورد توجه قرار گرفته است [1,3].

طراحی مدرن سازه‌های دریایی به سمت طراحی مبتنی بر عملکرد سوق یافته است. در این پژوهش معیارهای آسیب‌پذیری و سطوح عملکرد تعریف‌شده در استانداردهای PIANC و OCDI به‌عنوان چارچوب ارزیابی به‌کار گرفته شده‌اند. شاخص‌هایی همچون جابجایی افقی باقی‌مانده، نشست، چرخش و شدت آریاس برای قضاوت در مورد سطح عملکرد از قابل‌سرویس تا فروریزش استفاده می‌شوند. پدیده‌های خاص لرزه‌ای مانند رزونانس و روان‌گرایی نیز به‌طور عمیق تحلیل می‌گردند.

ارزش اصلی این پژوهش در ارائه یک مطالعه پارامتری عددی نظام‌مند است که اثر توأم فاصله از گسل، مشخصات ژئوتکنیکی و هندسی را بر پاسخ لرزه‌ای موج‌شکن کیسونی کمی‌سازی می‌کند. اگرچه از روش‌های بهینه‌سازی ریاضی رسمی استفاده نشده، نتایج پارامتریک امکان ارائه توصیه‌های کمی محدود به دامنه بررسی‌شده را فراهم می‌آورد.

۲ - معادلات حاکم و شرایط مرزی

در این پژوهش، به‌منظور شبیه‌سازی رفتار لرزه‌ای موج‌شکن کیسونی مرکب تحت اثر زلزله‌های حوزه نزدیک و دور، معادلات حاکم بر دینامیک خاک، تحلیل تاریخچه‌زمانی و تحلیل فرکانسی به‌کار گرفته شده‌اند. با توجه به ماهیت پیچیده اندرکنش خاک–سازه–آب و رفتار غیرخطی مصالح تحت بارهای دینامیکی شدید، انتخاب مدل رفتاری مناسب برای خاک و استفاده از روش‌های پیشرفته عددی ضروری است.

۲-۱- معادلات حاکم بر دینامیک خاک و لندرکنش خاک–سازه

برای مدل‌سازی رفتار خاک بستر در برابر بارهای لرزه‌ای چرخه‌ای، از مدل پیشرفته پلاستیک‌سازی سینماتیک سخت‌شونده (Hardening Soil)استفاده شده است. این مدل قادر به شبیه‌سازی رفتار الاستوپلاستیک خاک، وابستگی سختی به سطح تنش، انقباض و اتساع خاک‌های دانه‌ای و میرایی هیسترزیس ناشی از بارگذاری چرخه‌ای است. معادله عمومی سختی در این مدل به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$E_{50} = E_{50}^{ref} \left[\frac{c\cos\varphi - \sigma_3 \sin\varphi}{c\cos\varphi + p^{ref}\sin\varphi} \right]^m \qquad (1)$$

که در آن E_{50}مدول سکانت مربوط به ۵۰ درصد مقاومت نهایی، E_{50}^{ref}مدول مرجع، cچسبندگی، φزاویه اصطکاک داخلی، σ_3تنش اصلی سوم، p^{ref}تنش مرجع و mتوان وابستگی به تنش است.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-23]

برای شبیه‌سازی اندرکنش دینامیکی خاک و سازه، معادله تعادل دینامیکی در محیط متخلخل اشباع بر اساس فرمول‌بندی بیو (Biot)به‌صورت زیر نوشته می‌شود:

$$G\nabla^2 u + (G+\lambda)\nabla(\nabla\cdot u) = \rho\ddot{u} + \rho_w\ddot{w} \quad (2)$$

$$-\nabla p = \rho_w\ddot{u} + \frac{\rho_w}{n}\ddot{w} + \frac{\mu}{k}\dot{w} \quad (3)$$

در روابط فوق، Gمدول برشی، λثابت لامه، uبردار جابجایی اسکلت خاک، pفشار آب حفره‌ای، ρچگالی کل، ρ_wچگالی آب، nتخلخل، kضریب نفوذپذیری، μلزجت دینامیکی سیال و $\dot{w}$و $\ddot{w}$به‌ترتیب سرعت و شتاب نسبی سیال نسبت به اسکلت خاک هستند.

۲-۲- معادلات حاکم بر تحلیل دینامیکی تاریخچه‌زمانی

تحلیل دینامیکی غیرخطی تاریخچه‌زمانی به‌عنوان دقیق‌ترین روش موجود برای شبیه‌سازی پاسخ سازه‌های ژئوتکنیکی تحت اثر حرکات قوی زمین، با استفاده از روش صریح در حوزه زمان انجام شده است. معادله حرکت عمومی برای سیستم چند درجه آزادی به‌صورت زیر بیان می‌شود:

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = -[M]\{\ddot{u}_g\} \quad (۴)$$

که در آن $[M]$ماتریس جرم، $[C]$ماتریس میرایی، $[K]$ماتریس سختی، $\{\ddot{u}\}$بردار شتاب، $\{\dot{u}\}$بردار سرعت، $\{u\}$بردار جابجایی نسبی و $\{\ddot{u}_g\}$بردار شتاب زمین (بار لرزه‌ای ورودی) است. تحلیل دینامیکی با گام‌های زمانی بسیار کوچک (کسری از صدم ثانیه) برای حفظ پایداری عددی و ثبت پاسخ فرکانسی بالا انجام شده است. بار لرزه‌ای در قالب تاریخچه زمانی شتاب مستقیماً به مرز پایینی مدل اعمال گردیده است.

۲-۳- معادلات حاکم بر تحلیل فرکانسی و پدیده رزونانس

به‌منظور شناسایی فرکانس‌های طبیعی سیستم و بررسی پدیده تشدید (رزونانس)، از تبدیل فوریه و تحلیل طیف توان استفاده شده است. تبدیل فوریه یک سیگنال در حوزه زمان (مانند تاریخچه شتاب) را به حوزه فرکانس منتقل می‌کند:

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t)\, e^{-i\omega t}\, dt \quad (5)$$

که در آن $F(\omega)$طیف دامنه فوریه در فرکانس زاویه‌ای ω، $f(t)$سیگنال در حوزه زمان و iواحد موهومی است.

طیف توان (Power Spectrum) از مربع دامنه طیف فوریه به‌دست می‌آید و توزیع انرژی سیگنال را بر حسب فرکانس نشان می‌دهد:

$$S(\omega) = |F(\omega)|^2 \quad (6)$$

فرکانس طبیعی سیستم با فرض سیستم یک درجه آزادی معادل به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k_{\text{eff}}}{m_{\text{eff}}}} \quad (7)$$

که در آن k_{eff}سختی مؤثر سیستم (شامل سختی خاک و کیسون) و m_{eff}جرم مؤثر (شامل جرم کیسون و بخشی از خاک مشارکت‌کننده) است.

بر اساس تحلیل فرکانسی انجام‌شده، فرکانس بحرانی سیستم برای مدل‌های با خاک سفت ($E = 50000\ \text{kN/m}^2$) در محدوده ۱۶ تا ۲۵ هرتز (معادل فرکانس زاویه‌ای ۱۰۰ تا ۱۵۰ رادیان بر ثانیه) شناسایی شده است. لازم به ذکر است که تحلیل مودال مستقل انجام نشده و فرکانس طبیعی از پیک طیف توان تاریخچه شتاب تاج (پس‌پردازش خارجی) به‌عنوان تخمینی از فرکانس سیستم استخراج گردیده است. بنابراین بحث رزونانس جنبه توصیفی–تحلیلی دارد.

۲-۴- پیاده‌سازی معادلات در نرم‌افزار PLAXIS 2D

مدل Hardening Soil پیاده‌سازی‌شده در PLAXIS 2D مستقیماً فرمولاسیون سختی وابسته به تنش معادله (۱) را در بر می‌گیرد. معادلات تعادل دینامیکی (۲) و (۳) بر اساس نظریه بیو، با استفاده از فرمول‌بندی کاملاً جفت‌شده جریان–تغییرشکل تحت شرایط زهکشی‌نشده یا نیمه‌زهکشی‌شده (بسته به نفوذپذیری اختصاص‌یافته به هر لایه) حل می‌شوند.

معادله حرکت کلی (۴) در حوزه زمان با استفاده از طرح صریح نیومارک و گام‌های زمانی بسیار کوچک (معمولاً ۰٫۰۱ ثانیه یا کمتر) یکپارچه می‌گردد تا پایداری عددی تضمین و محتوای فرکانسی بالا به‌دقت ثبت شود.

تحلیل فرکانسی مربوط به معادلات (۵)، (۶) و (۷) به‌صورت پس‌پردازش خارجی بر روی تاریخچه‌های زمانی شتاب استخراج‌شده از PLAXIS انجام می‌گیرد. بدین منظور، تبدیل فوریه و محاسبه طیف توان با استفاده از روتین‌های استاندارد پردازش سیگنال صورت می‌پذیرد و فرکانس طبیعی سیستم بر اساس سختی و جرم مؤثر تخمین زده می‌شود. مرزهای جاذب Lysmer–Kuhlemeyerدر مرزهای جانبی مدل اعمال شده‌اند تا انعکاس‌های ساختگی امواج به حداقل برسد و شرایط تئوری معادلات دینامیکی به‌درستی رعایت شود.

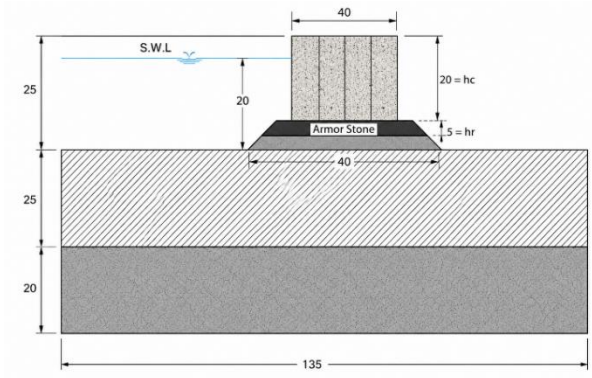
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-23]

۳ - مدل‌سازی و سناریوهای تحلیل

پیش از ورود به تحلیل و تفسیر نتایج عددی، ارائه تصویری روشن و ساختاریافته از چارچوب مدل‌سازی و سناریوهای مورد بررسی، امری ضروری است. مدل‌سازی عددی رفتار لرزه‌ای موج‌شکن‌های کیسونی به دلیل ماهیت چندفیزیکی اندرکنش خاک-سازه-آب و رفتار غیرخطی مصالح تحت بارهای دینامیکی شدید، بدون تشریح دقیق مفروضات، پارامترها و مرزهای تحلیل امکان‌پذیر نیست. در این بخش، ابتدا مدل عددی ایجادشده در نرم‌افزار PLAXIS2D تشریح شده، سپس سناریوهای لرزه‌ای و ژئوتکنیکی تعریف‌شده معرفی می‌گردند. اندرکنش دینامیکی آب–سازه به‌صورت ساده‌سازی‌شده (از طریق شرایط مرزی و چگالی آب در معادلات بیو) در نظر گرفته شده است. محدودیت‌های این فرض (عدم مدل‌سازی صریح هیدرودینامیک موج و اثرات سه‌بعدی) در بخش محدودیت‌ها بحث شده است.

۳-۱- تشریح مدل عددی و مفروضات اساسی در PLAXIS 2D

مدل‌سازی با نرم‌افزار اجزای محدود PLAXIS 2D و رویکرد تحلیل دینامیکی غیرخطی تاریخچه‌زمانی انجام شده است. ابعاد دامنه به‌گونه‌ای طراحی شده که اثرات مرزی حداقل گردد. اجزای اصلی شامل کیسون بتنی (ارتفاع ۱۰ یا ۲۰ متر)، پایه توده‌سنگی با شیب ثابت و خاک بستر (ضخامت ۵ یا ۱۰ متر) است. از المان‌های مثلثی ۱۵گرهی و شرایط کرنش صفحه‌ای استفاده شده است. شبکه‌بندی در اطراف کیسون متراکم‌تر در نظر گرفته شده است (شکل ۱).



شکل ۱ - مشخصات هندسی موج شکن مرکب

خاک بستر با مدل Hardening Soil ، بتن کیسون با مدل الاستیک خطی و توده‌سنگی با مدل Mohr-Coulomb (چسبندگی صفر) مدل شده‌اند. مشخصات مصالح در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱ - مشخصات مکانیکی مصالح به کار رفته در مدل عددی

مصالح	مدل رفتاری	وزن مخصوص (kN/m³)	چسبندگی (kPa)	زاویه اصطکاک (درجه)	مدول الاستیسیته (MPa)
خاک بستر	Hardening Soil	18	5	30–50	10–50
توده سنگی	Mohr–Coulomb	20	0	40	100
بتن کیسون	Elastic	24	–	–	25000

در طرفین مدل از مرزهای جاذب Lysmer–Kuhlemeyer استفاده شده و مرز پایینی صلب در نظر گرفته شده است. پیش از اعمال بار لرزه‌ای، تحلیل استاتیکی برای ایجاد تنش‌های اولیه ژئواستاتیک انجام شده است.

ضریب تخلخل لایه توده‌سنگی بر نفوذپذیری و نرخ استهلاک فشار آب حفره‌ای اضافی تأثیر مستقیم دارد و می‌تواند میرایی هیسترزیس را تحت بار لرزه‌ای تغییر دهد. در مدل حاضر، پارامترهای نفوذپذیری متناسب با تخلخل معمول سنگریزه انتخاب شده است. مطالعات اخیر نیز اهمیت شرایط زهکشی و تخلخل را در کاهش نشست و جابجایی موج‌شکن‌های کیسونی مرکب تأیید کرده‌اند [8].

۳-۲- معرفی نظام‌مند سناریوهای لرزه‌ای و ژئوتکنیکی

سه زلزله شاخص به‌عنوان ورودی دینامیکی انتخاب شده‌اند (جدول ۲). برای هر زلزله دو رکورد حوزه نزدیک (فاصله کم از گسل و حضور پالس سرعت) و حوزه دور (فاصله بیش از حدود ۱۹۰ کیلومتر) در نظر گرفته شده است. فواصل بر اساس معیارهای متداول حوزه نزدیک و دور و مشخصات واقعی رکوردهای Chuetsu، Landers و Bam تعیین گردیده‌اند تا تفاوت محتوای فرکانسی به‌وضوح قابل‌مقایسه باشد.

جدول ۲- مشخصات زلزله‌های انتخاب‌شده برای تحلیل

ردیف	نام زلزله	سال	بزرگا	مکانیزم گسل	فاصله نزدیک (km)	فاصله دور (km)
1	Chuetsu-oki (ژاپن)	2007	6.8	معکوس	≈0	≈300
2	Landers (کالیفرنیا)	1992	7.3	امتدادلغز	≈2.2	≈190
3	Bam (ایران)	2003	6.6	امتدادلغز	≈0.05	≈282

۳-۲-۱- سناریوهای ژئوتکنیکی و سازه‌ای

پارامترهای متغیر عبارتند از: ارتفاع کیسون (H_c): ۱۰ و ۲۰ متر؛ ضخامت لایه خاک زیر کیسون(H_s) : ۵ و ۱۰ متر؛ مدول یانگ خاک (E): ۱۰۰۰۰، ۳۰۰۰۰ و ۵۰۰۰۰ kN/m^2؛ زاویه اصطکاک داخلی (φ): ۳۰، ۴۰ و ۵۰ درجه (جدول۳).

جدول ۳- ماتریس سناریوهای ترکیبی (نمونه برای زلزله حوزه نزدیک Chuetsu)

ردیف	زلزله	Hc (m)	Hs (m)	E (kN/m²)	φ (درجه)
۱	Chuetsu (نزدیک)	۲۰	۵	۵۰۰۰۰	۳۰
۲	Chuetsu (نزدیک)	۲۰	۱۰	۵۰۰۰۰	۳۰
۳	Chuetsu (نزدیک)	۱۰	۵	۵۰۰۰۰	۳۰
۴	Chuetsu (نزدیک)	۱۰	۱۰	۵۰۰۰۰	۳۰
۵	Chuetsu (نزدیک)	۲۰	۵	۱۰۰۰۰	۵۰

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-23]

سناریوی شماره ۵ جدول ۳ با تغییر همزمان مدول الاستیسیته خاک و شیب موج‌شکن طراحی شده است تا اثر متقابل این دو پارامتر بر پاسخ لرزه‌ای آشکار شود. نتایج نشان داد که ترکیب این دو متغیر الگوی جابجایی و شتاب را به‌صورت غیرخطی تغییر می‌دهد و به شناسایی محدوده‌های بحرانی کمک می‌کند.

پارامترهای کلیدی پاسخ شامل جابجایی افقی حداکثر و باقی‌مانده در تاج کیسون، شتاب افقی بیشینه، طیف توان فرکانسی، نشست و چرخش کیسون است. ارزیابی عملکرد بر اساس معیارهای PIANC و OCDI در چهار سطح قابل‌سرویس، قابل‌تعمیر، نزدیک به فروریزش و فروریزش انجام شده است.

۴ - کالیبراسیون و اعتبارسنجی مدل عددی

۴-۱ -مطالعه مرجع و روش‌شناسی

نتایج شبیه‌سازی دینامیکی با داده‌های منتشرشده در مطالعه مرجع [۹] مقایسه شد. مطالعه مرجع تحلیل تاریخچه‌زمانی یک سازه کیسون دریایی تحت زلزله نورتریج را گزارش کرده است. پس از بازتولید مدل مرجع در PLAXIS 2D ، خطای کمتر از ۵ درصد برای نقاط کلیدی کیسون به‌دست آمد (جدول ۴). لازم به ذکر است که به‌دلیل در دسترس نبودن داده‌های شتاب، فشار آب حفره‌ای و طیف پاسخ از مطالعه مرجع، مقایسه جامع‌تر امکان‌پذیر نبوده است. اعتبارسنجی گسترده‌تر با داده‌های آزمایشگاهی یا سانتریفیوژ در مطالعات آینده ضروری است. الگوی زمانی جابجایی‌ها نیز تطابق کیفی عالی نشان داد. تحلیل حساسیت مش نشان داد تفاوت بین شبکه متوسط و ریز در جابجایی تاج کیسون کمتر از ۱ درصد است.

جدول ۴ - مقایسه نتایج مدل حاضر با مطالعه مرجع

مقایسه نتایج مقاله مرجع و مدل عددی PLAXIS 2D

پارامتر	مقاله مرجع (Brodback & Laursen, 2010)	مدل PLAXIS 2D (2024.2)	اختلاف (%)	ارزیابی
جابجایی افقی بالای کیسون (cm)	28.1	29.4	+4.6	تطابق بسیار خوب
جابجایی افقی پایین کیسون (cm)	15.5	16.1	+3.9	تطابق بسیار خوب
جابجایی افقی بالای سنگ بستر (cm)	≈5.0	5.8	+7.0	تطابق خوب
حداکثر شتاب متوسط کیسون (g)	0.15	0.153	+2.0	تطابق بسیار خوب

* اختلاف (%) = (مقدار مدل PLAXIS 2D − مقدار مقاله مرجع) / مقدار مقاله مرجع × ۱۰۰

۴-۲ - جمع‌بندی اعتبارسنجی

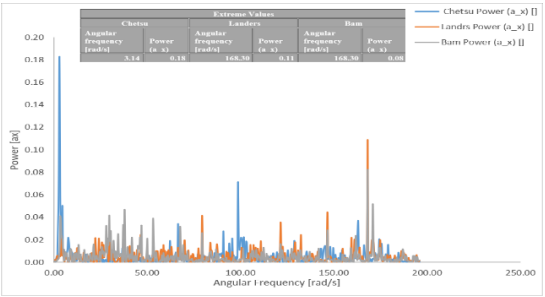
با توجه به خطای کمتر از ۵٪ برای نقاط کلیدی کیسون، مدل توسعه‌یافته از قابلیت اطمینان لازم برای تحلیل‌های پارامتریک و سناریوهای اصلی این پژوهش برخوردار است.

۵- نتایج و تحلیل

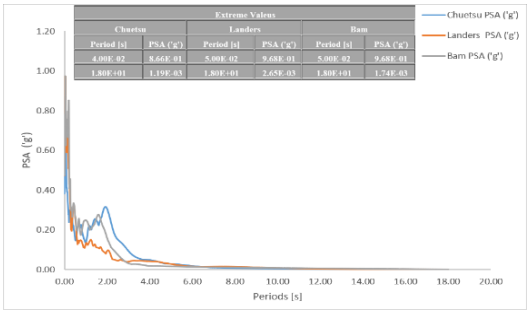
در این بخش، ابتدا پاسخ فرکانسی و پدیده رزونانس، سپس تغییرمکان‌ها و شتاب‌ها، و در نهایت اثر پارامترهای کلیدی بر عملکرد لرزه‌ای موج‌شکن کیسونی ارائه می‌گردد. بسیاری از روندهای مشاهده‌شده (افزایش جابجایی با افزایش ارتفاع کیسون، اثر خاک نرم و شدت بیشتر پاسخ در حوزه نزدیک) با مبانی شناخته‌شده مهندسی زلزله سازگار هستند. ارزش مطالعه در کمی‌سازی این اثرات در چارچوب ترکیبی پارامترها و ارائه محدوده‌های عددی برای سطوح عملکرد PIANC است.

۵-۱- تحلیل پاسخ فرکانسی و شناسایی رزونانس

تحلیل طیف توان شتاب تاج کیسون (شکل ۲) وجود یک پیک غالب در محدوده فرکانس طبیعی سیستم را نشان می‌دهد. همپوشانی این فرکانس با محتوای فرکانس زلزله‌های نزدیک‌گسل به‌ویژه Chuetsu منجر به پدیده تشدید شده است. زلزله‌های حوزه دور به‌دلیل تضعیف مؤلفه‌های فرکانس بالا چنین تشدیدی ایجاد نمی‌کنند.



شکل ۲ - طیف توان فرکانسی شتاب تاج کیسون

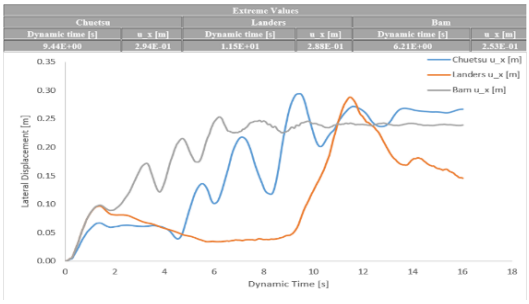


شکل ۳ - نمودار PSA ،نقطه تاج موج شکن کسونی

۵-۲- تحلیل جابجایی‌ها و تغییرشکل‌ها

جابجایی افقی تاج کیسون تحت زلزله‌های نزدیک دارای الگوی پله‌ای و تجمعی است (شکل ۴). با کاهش ارتفاع کیسون از ۲۰ به ۱۰ متر تحت زلزله Chuetsu ، جابجایی نهایی از ۰.۲۹۴ متر به ۰.۱۱ متر کاهش می‌یابد (کاهش ۶۳ درصد). این تأثیر در همه سناریوها پایدار است.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-23]

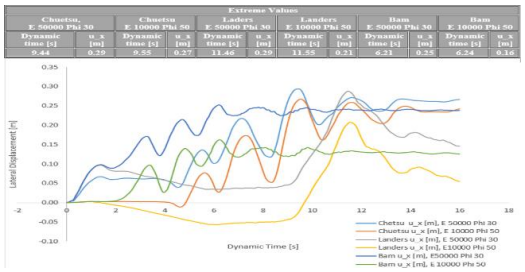


شکل ۴ - تغییرات جابه جایی افقی تاج موج شکن کیسونی

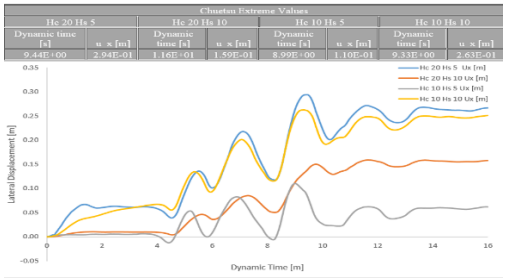
در خاک نرم نسبت به خاک سفت جابجایی افقی نهایی کاهش یافته است. برای زلزله بم این کاهش حدود ۳۶ درصد است. افزایش ضخامت خاک از ۵ به ۱۰ متر در کیسون بلند جابجایی را تا ۴۶ درصد کاهش می‌دهد (جدول ۵ و شکل ۵).

جدول ۵- خلاصه بیشینه نتایج برای مدل‌خاک نرم

u_x (m)	a_x (m/s²)	Hs (m)	Hc (m)
0.278	2.53	5	20
0.255	2.30	10	20
0.119	1.38	5	10
0.119	1.73	10	10



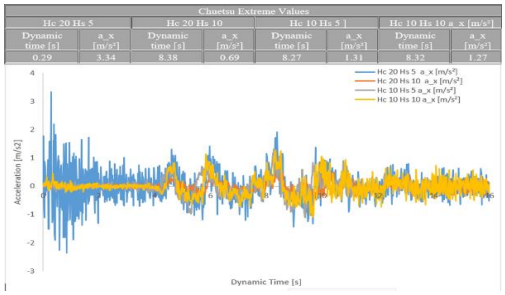
شکل ۵- تغییرات جابجایی افقی تاج در برابر زلزله (اثر سختی خاک)



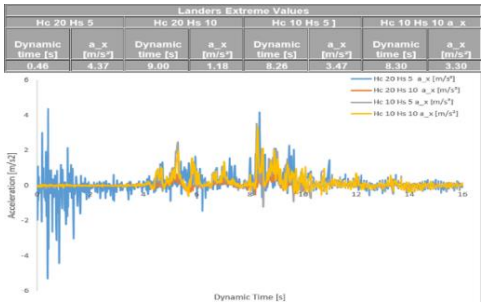
شکل ۶- تاریخچه جابجایی افقی تاج تحت زلزله چوئتسو

۵-۳- تحلیل شتاب‌ها و شدت لرزه‌ای

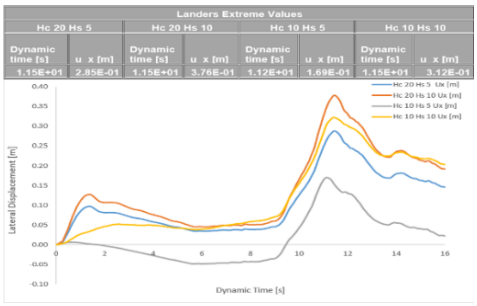
شتاب افقی بیشینه در تاج کیسون برای زلزله Landers به ۴،۳۷ متر بر مجذور ثانیه می‌رسد. با افزایش ضخامت خاک از ۵ به ۱۰ متر این شتاب در کیسون بلند تا ۶۴ درصد کاهش می‌یابد (شکل ۷ و ۸).



شکل ۷- تحلیل پاسخ شتاب افقی تاج موج‌شکن کیسونی تحت اثر زلزله نزدیک چوئتسو



شکل ۸- تغییرات شتاب در سازه تحت زلزله لندرز



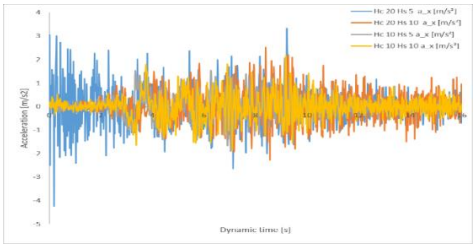
شکل۹- تحلیل تاریخچه زمانی جابجایی افقی تاج موج‌شکن کیسونی تحت اثر زلزله نزدیک لندرز

۵-۴- تحلیل حساسیت به نوع زلزله (مقایسه حوزه نزدیک و دور)

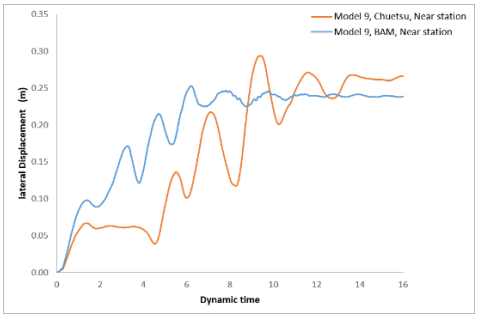
در حوزه دور مقادیر شتاب و جابجایی به‌طور متوسط ۳۰ تا ۶۰ درصد نسبت به حوزه نزدیک کاهش یافته است. با این حال زلزله بم در حوزه دور همچنان مخرب‌ترین رکورد است، زیرا انرژی بالایی در فرکانس پایین (حدود ۰.۵ هرتز) دارد که با پریود طبیعی بلند سیستم در خاک نرم همپوشانی دارد (شکل ۱۰ و ۱۱).

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-23]

Chuetsu Extreme Values							
Hc 20 Hs 5		Hc 20 Hs 10		Hc 10 Hs 5]		Hc 10 Hs 10	
Dynamic time [s]	a_x [m/s²]	Dynamic time [s]	a_x [m/s²]	Dynamic time [s]	a_x [m/s²]	Dynamic time [s]	a_x [m/s²]
0.19	-4.25	8.56	-2.28	9.14	2.05	7.10	-1.82



شکل ۱۰- تغییرات شتاب در سازه تحت زلزله بم



شکل ۱۱- تاریخچه جابجایی افقی تاج تحت زلزله بم

۵-۵- جمع‌بندی نتایج

- ارتفاع کیسون قوی‌ترین پارامتر کنترل‌کننده است؛ کیسون‌های ۲۰ متری باجابجایی ۲ تا ۳ برابر و شتاب حدود ۲ برابری نسبت به کیسون‌های ۱۰ متری تجربه می‌کنند.
- رزونانس در خاک‌های سفت در محدوده ۱۶–۲۵ هرتز رخ می‌دهد و با محتوای فرکانسی زلزله‌های نزدیک‌گسل همپوشانی خطرناکی دارد.
- خاک نرم با میرایی هیسترزیس بالا شتاب ورودی را کاهش می‌دهد اما جابجایی‌های بزرگ‌تری (تا حدود ۳۵ سانتی‌متر) مجاز می‌دارد.
- زلزله بم حتی در حوزه دور به‌دلیل انرژی بالا در فرکانس پایین تهدیدی جدی برای سیستم‌های با پریود بلند است.
- بر اساس معیارPIANC ، کیسون‌های ۱۰ متری در محدوده قابل‌سرویس (جابجایی کمتر از ۰.۲ متر) و کیسون‌های ۲۰ متری در مرز قابل‌تعمیر یا نزدیک به فروریزش (جابجایی بیش از ۰.۳ متر) قرار می‌گیرند.

۶- نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

در این پژوهش رفتار لرزه‌ای موج‌شکن‌های کیسونی تحت اثر زلزله‌های حوزه نزدیک و دور با استفاده از تحلیل دینامیکی غیرخطی تاریخچه‌زمانی در PLAXIS 2D بررسی شد. در چارچوب محدودیت‌های مدل عددی (فرض کرنش صفحه‌ای دوبعدی، پارامترهای انتخاب‌شده مدل رفتاری، مجموعه محدود رکوردها، ساده‌سازی اندرکنش آب–سازه و اعتبارسنجی محدود به جابجایی)، نتایج نشان می‌دهد که ارتفاع کیسون مؤثرترین پارامتر هندسی کنترل‌کننده پاسخ است. کیسون کوتاه در اکثر سناریوهای تحلیل‌شده بر اساس معیار PIANC به‌خوبی کمتر از حد قابل‌سرویس باقی می‌ماند، در حالی که کیسون‌های بلند در خاک نرم به آستانه‌های قابل‌تعمیر یا نزدیک به فروریزش نزدیک می‌شوند. این توصیه‌ها (کاهش ارتفاع کیسون و بهسازی خاک) صرفاً بر اساس نتایج مدل عددی حاضر و دامنه محدود پارامترهای بررسی‌شده ارائه شده‌اند و نباید به‌عنوان دستورالعمل طراحی عمومی تلقی شوند. تشدید رزونانسی در خاک سفت در محدوده ۱۶–۲۵ هرتز برای رکوردهای حوزه نزدیک به‌وضوح مشاهده شد. این یافته‌ها باید با احتیاط تفسیر شوند: مقادیر مطلق جابجایی به پارامترهای سختی خاک، شرایط زهکشی و مجموعه خاص حرکات زمین حساس هستند. مطالعات آینده با مجموعه بزرگ‌تری از رکوردها، تحلیل مودال مستقل، مدل‌سازی کامل‌تر اندرکنش آب–سازه و اعتبارسنجی آزمایشگاهی می‌تواند اطمینان به یافته‌ها را افزایش دهد. کاهش ارتفاع کیسون و بهسازی خاک زیرین به‌عنوان مؤثرترین راهکارهای عملی پیشنهاد می‌شود. در پژوهش های جدید نیز اهمیت بهسازی و در نظر گرفتن اثرات غیرخطی را در کاهش نشست و جابجایی تأیید کرده‌اند[8,10].

۷ – مراجع

1- Brinkgreve, R. B. J., Kumarswamy, S., & Swolfs, W. M. (2023). *PLAXIS 2D Reference Manual*. Bentley Systems International. [DOI:10.1061/JMCEA3.0001144]
2- Lysmer, J., & Kuhlemeyer, R. L. (1969). *Finite dynamic model for infinite media*. Journal of the Engineering Mechanics Division, 95(4), 859–878. [DOI:10.1061/JMCEA3.0001144]
3- PIANC. (2001). *Seismic design guidelines for port structures*. International Navigation Association. [DOI:10.1201/9780367800369]
4- OCDI. (2018). *Technical standards and commentaries for port and harbour facilities in Japan*. Overseas Coastal Area Development Institute. [DOI:10.2208/jscejoe.77.2_I_871]
5- Kramer, S. L. (1996). *Geotechnical earthquake engineering*. Prentice-Hall. ISBN 0-13-374943-6. [DOI:10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0000619]
6- Somerville, P. G., Smith, N. F., Graves, R. W., & Abrahamson, N. A. (1997). *Modification of empirical strong ground motion attenuation relations to include the amplitude and duration*

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-23]

effects of rupture directivity. Seismological Research Letters, 68(1), 199–222. [DOI:10.1785/gssrl.68.1.199]

7- Takahashi, S., Kuriyama, Y., & Tanimoto, K. (2015). *Seismic performance of caisson breakwaters based on displacement-based design*. Coastal Engineering Journal, 57(3), 1550012. [DOI:10.1142/S0578563415500126]

8- Ebrahimian, B., Roshanfar, M., & Ghalandarzadeh, A. (2025). *Experimental investigation of remediation techniques for enhancing the seismic performance of offshore caisson-type composite breakwaters on liquefiable seabed soils*. Ocean Engineering, Article 121035. [DOI:10.1016/j.oceaneng.2025.121035]

9- Brodbaek, C., & Laursen, P. (2010). *Seismic design of marine caisson waterfront structures*. In Proceedings of the 2010 ASCE Conference (pp. 1–10). [DOI:10.1061/41098(368)49]

10- Zhao, T., & Ye, J. (2025). *Seismic dynamics of composite breakwater on liquefiable sandy seabed with the consideration of geometric nonlinearity*. Ocean Engineering, 341(Part 1), Article 122563. [DOI:10.1016/j.oceaneng.2025.122563]

11- Ebrahimian, B., & Hossein Panahi, A. (2026). *Seismic fragility assessment of rubble mound breakwaters over liquefiable marine deposits: Effects of seabed stratification and soil improvement*. Ocean Engineering, 343(Part 3), Article 123374. [DOI:10.1016/j.oceaneng.2025.123374]

12- Nguyen, A.-D., Kim, Y.-S., & Kang, G.-O. (2024). *Experimental and numerical studies on behavior of upgraded caisson-type quay wall under earthquake loading*. Marine Georesources & Geotechnology, 42(12), 1844–1862. [DOI:10.1080/1064119X.2024.2304631]

13- Chopra, A. K. (2020). *Dynamics of structures: Theory and applications to earthquake engineering* (5th ed.). Pearson Education. [DOI:10.1193/1.1586173]

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-23]