مهندسی عمران شریف، (بهار ۱۳۹۴)
دوره‌ی ۲ - ۳۱، شماره‌ی ۱/۱، ص. ۸۳-۹۱

Original Article

بررسی پایداری لایه‌ی آرمور موج‌شکن‌های تاج‌بلند با مدل‌سازی عددی

علی پاک* **(استاد)**
محمد سرفراز (کارشناس ارشد)
دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

طراحی لایه‌ی آرمور و تأمین پایداری آنها مهم‌ترین مرحله در طراحی موج‌شکن‌های توده‌سنگی به‌شمار می‌رود. تاکنون، طراحی لایه‌ی آرمور متکی بر روابط تجربی و آزمایش‌های مدل فیزیکی بوده، که پارامترهای فیزیکی موج را به قطر آرمور مرتبط می‌کنند. در این روش‌ها، رابطه‌ی مستقیمی میان نیروی امواج و پایداری قطعات آرمور وجود ندارد. در این مطالعه با مدل‌سازی عددی، نیروهای وارد بر قطعات آرمور محاسبه و پایداری آنها در برابر امواج دریا مطالعه شده است. این مطالعه منحصر به بررسی پایداری آرمورهای مکعبی بدون درنظرگرفتن اثرات قفل و بست میان قطعات است. آنالیزها شامل محاسبه‌ی نیروها و لنگرهای اعمال‌شده به قطعات آرمور و ارزیابی سه مود ناپایداری برکنش، لغزش و چرخش قطعات به ازاء پارامترها و محل‌های مختلف قرارگیری آرمورهاست. نتایج حاصله نشان می‌دهد که نوع شکست موج تأثیر مهمی در میزان نیروهای وارده و پایداری قطعات آرمور دارد. تراز متوسط آب دریا و تراز بیشینه‌ی پایین‌روی موج، بحرانی‌ترین محل برای ناپایداری لایه‌ی آرمور تشخیص داده شده‌اند. در انتها، روابطی برای محاسبه‌ی میزان نیروها و لنگرهای وارده بر قطعات آرمور پیشنهاد شده است.

واژگان کلیدی: سازه‌های ساحلی، موج‌شکن‌های تاج‌بلند، پایداری لایه‌ی آرمور، نیروی امواج دریا، اندرکنش سازه و سیال، مدل‌سازی عددی.

pak@sharif.edu
sarfaraz@alum.sharif.edu

۱. مقدمه

موج‌شکن‌های توده‌سنگی یکی از سازه‌های معمول در سواحل بوده که وظیفه‌ی حفاظت از مناطق ساحلی و فراهم‌کردن محیطی آرام برای پهلوگیری کشتی‌ها را بر عهده دارند. مهم‌ترین و حساس‌ترین مرحله در طراحی این سازه‌ها، انتخاب وزن یا ابعاد قطعات بلوک بتنی یا سنگی بر روی شیب به‌عنوان آرمور برای حفاظت از سازه در برابر حمله‌ی امواج دریاست. امروزه به‌دلیل پیشرفت تکنولوژی بتن و یا عدم دسترسی به سنگ و همچنین خاصیت بیشتر قفل و بست قطعات بتنی، استفاده از آن‌ها به‌عنوان آرمور موج‌شکن مرسوم شده است.[۱و۲]

در حال حاضر، طراحی آرمور بر پایه‌ی روابط تجربی مانند هادسون[۱] و ون‌درمیر[۲] (محصول آزمایش‌های مدل فیزیکی) استوار بوده، که عمدتاً برای آرمورهای سنگی پیشنهاد شده‌اند.[۲] رابطه‌ی ساده‌ی هادسون به‌صورت رابطه‌ی ۱ است:[۳]

$$\frac{H}{\Delta D_{n50}} = (K_D \cot\alpha)^{\frac{1}{3}} \qquad (۱)$$

که در آن، H، Δ، D_{n50}، K_D و α به‌ترتیب ارتفاع موج، چگالی نسبی آرمور، قطر متوسط آرمور، ضریب پایداری و زاویه‌ی وجه موج‌شکن با افق است.

تنها عامل محیطی در رابطه‌ی هادسون، ارتفاع موج است و به سایر عوامل از جمله: دوره‌ی تناوب، طول موج و نوع شکست موج توجهی نمی‌شود. ون درمیر در سال ۱۹۹۰ رابطه‌یی پیشنهاد کرد که در آن اثر دوره‌ی تناوب و طول موج در نظر گرفته شده است. این تذکر لازم است که رابطه‌ی مذکور برای دو نوع شکست موج شیرجه‌یی[۳] و لغزشی[۴] ارائه شده و به شکست ریزشی[۵] در آن مستقیماً پرداخته نشده است. رابطه‌ی ون‌درمیر به‌صورت روابط ۲ و ۳ است:[۴]

ـ شکست شیرجه‌یی (رابطه‌ی ۲):

$$\frac{H\sqrt{\varepsilon}}{\Delta D_{n50}} = \frac{31}{5} P^{\frac{9}{50}} \left(\frac{S_d}{\sqrt{N}}\right)^{\frac{1}{5}} \qquad (۲)$$

ـ شکست لغزشی (رابطه‌ی ۳):

$$\frac{H}{\Delta D_{n50}} = P^{-\frac{9}{50}} \left(\frac{S_d}{\sqrt{N}}\right)^{\frac{1}{5}} \varepsilon^{P} \sqrt{\cot\alpha} \qquad (۳)$$

در روابط مذکور، ε پارامتر تشابه سطح ـ یا عدد ایریبارن[۶] ـ ($\varepsilon = \frac{\tan\alpha}{2\pi H/L}$)، T و L دوره‌ی تناوب و طول موج، P ضریب نفوذپذیری و S_d عدد آسیب است.

در روش‌های مرسوم طراحی لایه‌ی آرمور (روابط تجربی و آزمایشگاهی)، به بیان رابطه‌یی بین ارتفاع و طول موج و قطر آرمور موردنیاز اکتفا شده و نیروهای

---

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۱/۱۱/۲۸، اصلاحیه ۱۳۹۲/۴/۱۲، پذیرش ۱۳۹۲/۴/۱۹.

وارده به آرمور از طرف موج بررسی نمی‌شوند. به‌بیان دیگر، در روش‌های مرسوم، نیروی امواج، که عامل اصلی ناپایداری آرمورها هستند، درون جعبه‌ی سیاه[۷] نگاه داشته شده‌اند. لذا روش منطقی و اصولی‌تر برای بررسی پایداری لایه‌ی آرمور، تحلیل نیروهای وارده از سوی موج به آرمور است.

مطالعات اندکی در ارتباط با تحلیل پایداری لایه‌ی آرمور توسط بررسی نیروهای واردشده بر آن از سوی امواج انجام شده است، که عمدتاً به مدل‌های فیزیکی موج‌شکن‌های مستغرق اختصاص دارد. در پژوهشی نیز (۱۹۶۲) به اندازه‌گیری آزمایشگاهی نیروهای وارده از سوی موج برگوی‌های کروی پلاستیکی ایده‌آل پرداخته شده و این نتیجه به‌دست آمده است که نیروی قابل توجهی به آرمورها در هنگام برخورد پیشانی موج شکسته‌شده به آنها اعمال می‌شود.[۵] پژوهشگرانی نیز در سال ۱۹۹۳ به اندازه‌گیری آزمایشگاهی نیرو روی آرمورهای موج‌شکن مستغرق پرداخته‌اند. موج‌شکن پژوهش آنها دارای مقطع ذوزنقه‌یی و عرض تاج آن تقریباً ده برابر ارتفاع بود. آرمورها کاملاً کروی و در طول کل آزمایش دارای قطر ثابت بوده‌اند. نتایج نشان داده است که رابطه‌ی یک‌نوایی بین مقادیر نیروی اعمال‌شده به آرمور از طرف موج و ارتفاع موج وجود ندارد. همچنین مشاهده شده است که ارتباط پیچیده‌یی بین نیروهای وارده از سوی موج و پارامترهای موج حاکم است.[۶] پژوهشگر دیگری نیز در سال ۱۹۹۷ در تز دکتری خود به اندازه‌گیری آزمایشگاهی نیروهای وارد بر تک بلوک آرمور در موج‌شکن مستغرق و تاج‌کوتاه[۸] پرداخته است. وی دو عدد ناپایداری برای بررسی دو مود لغزش و چرخش آرمور بر مبنای نیروهای وارده از سوی موج تعریف کرده است. نتایج تحلیل وی نیز حاکی از آن بود که رابطه‌ی یک‌نوایی بین پارامترهای موج و نیروهای وارد از سوی موج وجود ندارد و همچنین با افزایش ارتفاع موج، لزوماً نیروهای وارد به آرمور و ناپایداری آن افزایش نمی‌یابند.[۷]

این مشاهدات که در تناقض با فرمول‌های تجربی مرسوم در طراحی آرمور هستند، ایجاب می‌کند که پژوهش‌های بیشتری در این زمینه صورت پذیرد. مدل‌های فیزیکی جهت بررسی اندرکنش موج و سازه، معمولاً به‌طور کامل از قوانین تشابه پیروی نمی‌کنند و برای غلبه بر این مشکل نیاز به ساخت مدل‌های بزرگ‌مقیاس آزمایشگاهی با هزینه و وقت زیاد است. همچنین تحلیل دقیق میدان جریان در حضور موج‌شکن‌ها بسیار پیچیده است و انجام آن در مدل‌های فیزیکی به هزینه‌ی زیادی نیاز دارد.[۸و۹] در مقابل، مدل‌های عددی از این مشکلات به‌دور هستند و می‌توانند برای تحلیل این‌گونه مسائل با دقت کافی به کار روند و به درک بیشتر پایداری لایه‌ی آرمور موج‌شکن کمک کنند.[۱۰-۱۲] در این مطالعه با استفاده از مدل‌سازی عددی دو بعدی، نیروهای وارده به آرمور موج‌شکن تاج‌بلند[۹] محاسبه شده‌اند و بر مبنای آن، پایداری آرمور بررسی شده است. رویکرد جدید معرفی‌شده در این مطالعه می‌تواند به‌منظور بررسی و ارزیابی پایداری لایه‌ی آرمور موج‌شکن‌های توده‌سنگی گسترش یابد و در آینده، مورد استفاده‌ی پژوهشگران و طراحان قرار گیرد.

۲. شرح مدل عددی

در این مطالعه، برای محاسبه‌ی نیروهای موج به آرمور از نرم‌افزار تجاری FLOW-۳D استفاده شده است. معادلات حاکم بر مدل عددی مذکور، بقای پیوستگی و مومنتوم (ناویر ـ استوکس)[۱۰] است. صحت‌سنجی مدل عددی با مقادیر آزمایشگاهی و روابط نیمه‌تجربی نشان داد که مدل آشفتگی شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ (LES)[۱۱]، دقت بالاتری دارند،[۱۳] و از آن برای درنظرگرفتن آشفتگی استفاده شده است. معادلات ۴ و ۵، معادلات بیان شده‌هستند:[۱۴]

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = ۰, \quad i = ۱, ۲, ۳ \tag{۴}$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}\bar{u}_i\bar{u}_j = -\frac{\partial \bar{P}}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\nu\left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i}\right) - \tau_{ij}\right], \quad i, j = ۱, ۲, ۳ \tag{۵}$$

که در آن‌ها، $\overline{u_i}$ مؤلفه‌ی لحظه‌یی سرعت در جهت i، $\bar{P}$ فشار و τ_{ij} تانسور تنش برشی است. در محاسبه‌ی این مؤلفه از مدل زیرشبکه‌ی[۱۲] اسماگورینسکی[۱۳] استفاده شده است (برای جزئیات بیشتر به منابع[۱۴-۱۶] مراجعه شود).

از روش حجم سیال (VOF)[۱۴] برای ردگیری و محاسبه‌ی سطح آزاد از طریق اختصاص مقدار پُرشدگی سلول به تابع F استفاده شده است (رابطه‌ی ۶):[۱۷]

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \bar{u}_i\frac{\partial F}{\partial x_i} = ۰ \tag{۶}$$

درنهایت، از تئوری موج خطی برای بیان پارامترهای میدان جریان در مرز ورود موج بهره گرفته شده است. نیروهای هیدرودینامیکی (فشاری و برشی) وارده به قطعه‌ی آرمور از سوی موج از طریق رابطه‌ی ۷ قابل تعیین هستند:[۱۸]

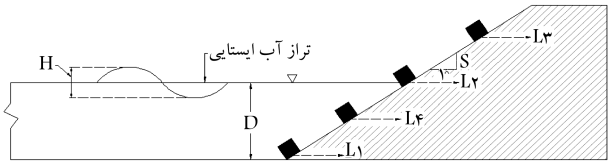
$$\vec{F} = \iint PndA + \iint \tau dA \tag{۷}$$

که در آن، dA جزء سطح قطعه‌ی آرمور و n بردار یکه‌ی عمود بر آن است.

برای ارزیابی پایداری لایه‌ی آرمور تحت نیروهای موج اعمال‌شده، ۴ محل برای قطعه‌ی آرمور انتخاب شده‌اند: پنجه‌ی موج‌شکن (L۱)، تراز آب ساکن (L۲)، بیشینه‌ی بالاروی (L۳)، و بیشینه‌ی پایین‌روی موج (L۴)، (شکل ۱). بدنه‌ی موج‌شکن به‌صورت نفوذناپذیر، تاج‌بلند و با شیب یکنواخت و آرمورها مکعبی و منفرد در نظر گرفته شده‌اند، با فرض اینکه در اثر چیدمان ضعیف، فاقد قفل و بست هستند.

سایر پارامترهای به‌کاررفته در این تحلیل عددی، ارتفاع موج (H)، دوره‌ی تناوب موج (T)، عمق آب ساکن (D) و طول ضلع آرمور (A) بوده، که در جدول ۱ ارائه شده‌اند.

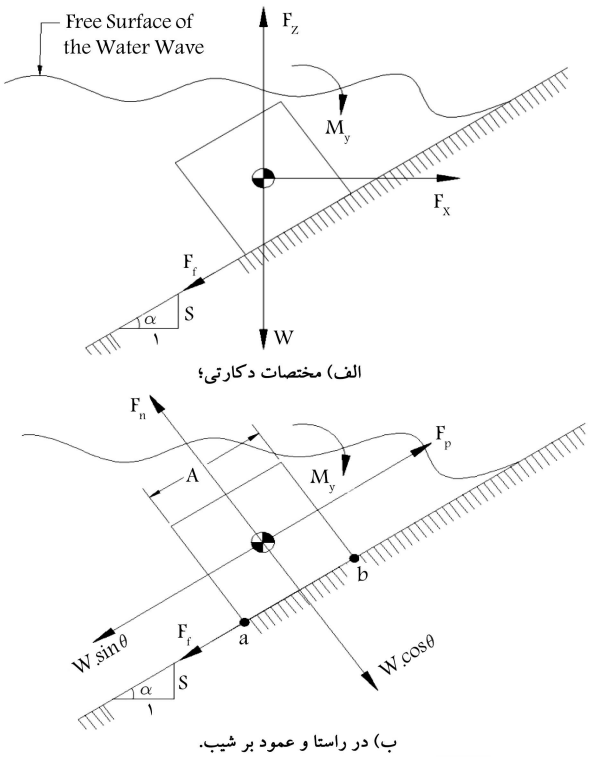
برای ارزیابی پایداری آرمور در برابر نیروهای امواج برخوردی به آن، سه مود ناپایداری برکنش (U.I.N.)[۱۵]، لغزش (S.I.N.)[۱۶] و چرخش (O.I.N.)[۱۷] قابل



شکل ۱. تعریف پارامترهای هندسی.

جدول ۱. پارامترهای مورد استفاده در تحلیل عددی.

A (m)	S (۱V : H)	D (m)	T (sec.)	H (m)
۱	۱٫۵	۱۰	۵	۲
۱٫۵	۲	۱۵	۷	۳
۲	۲٫۵	—	۱۰	۴
—	--	—	—	۵
—	--	—	—	۶



شکل ۲. تعریف نیروهای به‌کاررفته در تحلیل ناپایداری.

تعریف هستند و از طریق روابط ۸ الی ۱۲ کمّی شده‌اند:

$$\text{U.I.N.} = \frac{F_n}{W\cos\theta}, \quad failure: \text{U.I.N.} > ۱ \tag{۸}$$

$$\text{S.I.N.} = \frac{F_p - W\sin\alpha}{F_f}, \quad failure: |\text{S.I.N.}| > ۱ \tag{۹}$$

$$\text{O.I.N.}_a = \frac{F_n\frac{A}{۲} + W(\sin\alpha)\frac{A}{۲}}{M_y + F_p\frac{A}{۲} + W(\cos\alpha)\frac{A}{۲}} \tag{۱۰}$$

$$\text{O.I.N.}_b = \frac{F_n\frac{A}{۲} + F_p\frac{A}{۲} + M_y}{W\cos\alpha\left(\frac{A}{۲}\right) + W\sin\alpha\left(\frac{A}{۲}\right)} \tag{۱۱}$$

$$\text{O.I.N.} = \max\{\text{O.I.N.}_a, \text{O.I.N.}_b\}, \quad failure: |\text{O.I.N.}| > ۱ \tag{۱۲}$$

که در آن‌ها، F_n، F_p و M_y نیروها و لنگرهای اعمال‌شده به قطعه‌ی آرمور از طرف موج، F_f نیروی اصطکاک بین قطعه‌ی آرمور و سطح بدنه‌ی موج‌شکن و W وزن قطعه‌ی آرمور است. پارامترهای مذکور در شکل ۲ آمده است. ضریب اصطکاک و چگالی آرمور به ترتیب برابر با ۰٫۶ و ۲۳۰۰ kg/m^3 انتخاب شده‌اند.[۱۹] زبری سطوح آرمور و بدنه‌ی موج‌شکن ۱٫۵ میلی‌متر در نظر گرفته شده است.[۲۰] در این مطالعه، جهت تمایل حرکت و چرخش آرمور بررسی نشده است، لذا از مقدار (قدر مطلق) اعداد ناپایداری استفاده شده است.

۳. ارائه و تحلیل نتایج

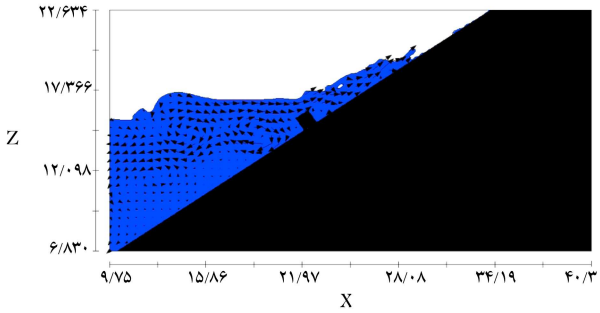
در این قسمت، مقادیر بیشینه‌ی نیرو و لنگر اعمال‌شده به آرمور و همچنین اعداد ناپایداری برای مکان‌های مختلف آرمور ارائه و تحلیل شده‌اند.

۳.۱. نیرو و لنگر بیشینه

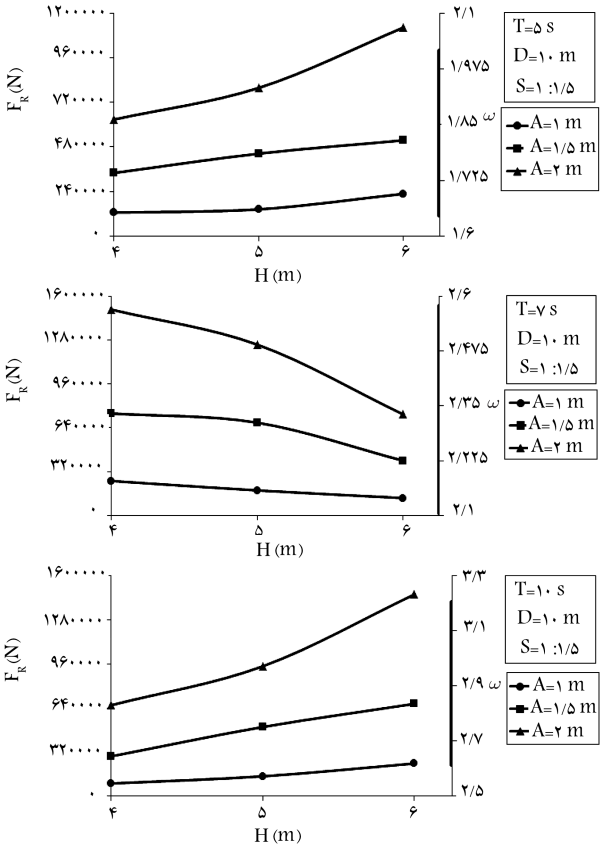
پروفیل موج سطحی در حال بالاروی از شیب در نزدیکی آرمور L۲ (تراز آب ساکن) برای پارامترهای $S = ۱ : ۱٫۵$، $T = ۵$ sec، $H = ۶$ m، $D = ۱۵$ m و $A = ۱$ m در شکل ۳ نمایش داده شده است. مطابق شکل، میدان جریان در نزدیکی آرمور بسیار پیچیده است و این آرمور در میدان اصلی فعالیت موج‌شکنا قرار گرفته است.

در شکل ۴، مقادیر نیروی بیشینه (F_R) بر حسب ارتفاع موج برای پارامترهای $S = ۱ : ۱٫۵$ و $D = ۱۰$ m آمده است. مطابق شکل برای $T = ۵, ۱۰$ sec با افزایش ارتفاع موج، نیروی وارد بر آرمور نیز زیاد و برای دوره‌ی تناوب $T = ۷$ sec رابطه‌ی مذکور برعکس شده است.

تغییرات F_R در قالب عدد بی‌بُعد $F_R^{۰٫۲}\gamma_w^{۰٫۲}/g\mu^{۰٫۴}$ (γ_w وزن مخصوص آب،



شکل ۳. نمونه‌یی از پروفیل موج در نزدیکی آرمور L۲.

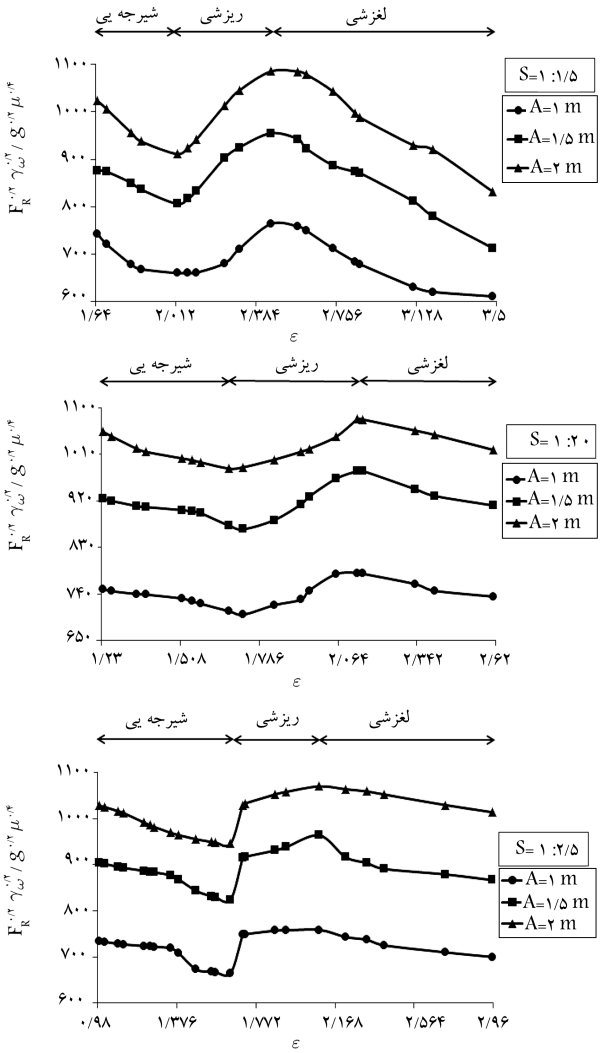


شکل ۴. تغییرات بیشینه‌ی نیرو با ارتفاع موج، آرمور L۲.

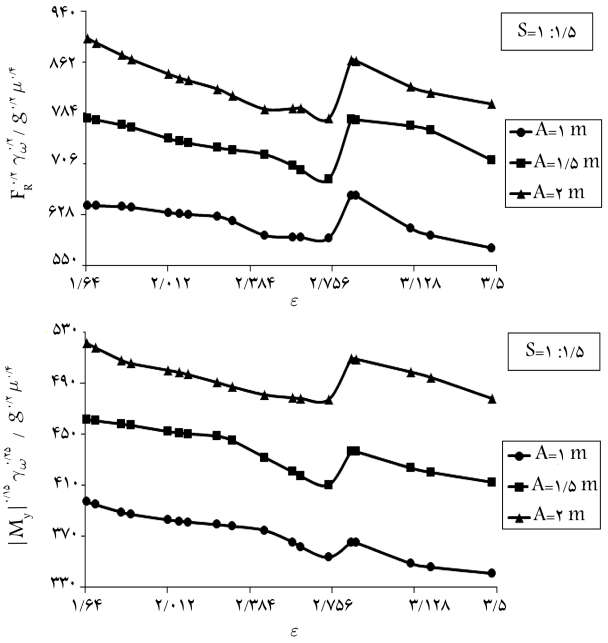
g شتاب گرانش و μ چسبندگی دینامیکی آب) برحسب ε به همراه نوع شکست موج در شکل ۵ برای آرمور L۲ و شیب‌های مختلف آمده است. مطابق این شکل، تغییرات نیروی بیشینه بر حسب پارامترهای موج یکنوا نیست و نوع شکست موج در این امر تأثیرگذار است. برای شکست لغزشی و شیرجه‌یی، با افزایش ارتفاع موج نیرو زیاد شده است و در رژیم شکست ریزشی عکس این قضیه صادق است. روند مشابهی برای مقادیر لنگر نیز برقرار بوده، که از آوردن آن صرف‌نظر شده است.

تغییرات مقادیر بیشینه‌ی نیرو و لنگر بر حسب عدد ایریبارن برای آرمور L۴ (تراز بیشینه‌ی پایین‌روی موج) در شکل ۶ رسم شده است. این شکل نشان می‌دهد که عدم وجود تغییرات یک‌نوا در خصوص آرمور L۴ نیز قابل مشاهده است. لیکن به دلیل فاصله بین این دو آرمور، نوع شکست موج به طور دقیق نمی‌تواند این رفتار را توجیه کند.

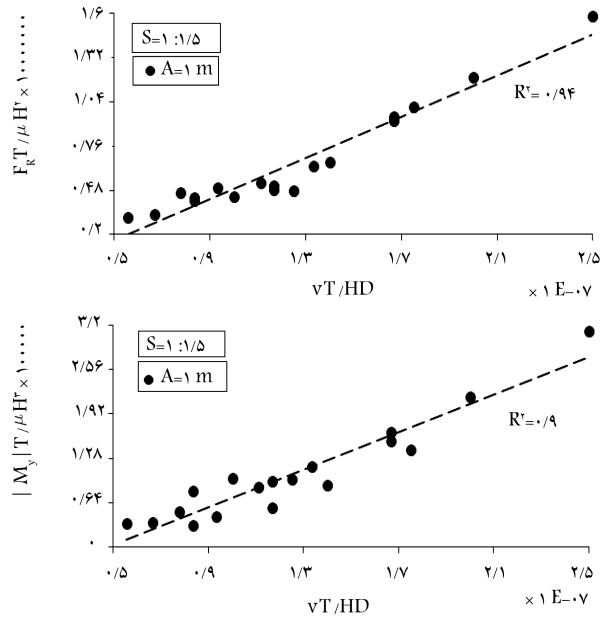
شکل ۷، تغییرات نیرو و لنگر آرمور L۱ (پنجه‌ی موج‌شکن) را برحسب پارامترهای موج نمایش می‌دهد. برخلاف آرمورهای L۲ و L۴، مقادیر مذکور به جای ε با عدد بی‌بُعد دیگری بیان شده و حاکی از این است که این آرمور به سبب فاصله از دو آرمور دیگر، اساساً در معرض شکست موج قرار نگرفته، به‌همین دلیل رفتار متفاوتی از خود نشان می‌دهد (ν چسبندگی سینماتیک آب).



شکل ۵. تغییرات نیروی بیشینه با پارامترهای موج، آرمور L۲.



شکل ۶. تغییرات نیرو و لنگر بیشینه با پارامترهای موج، آرمور L۴.

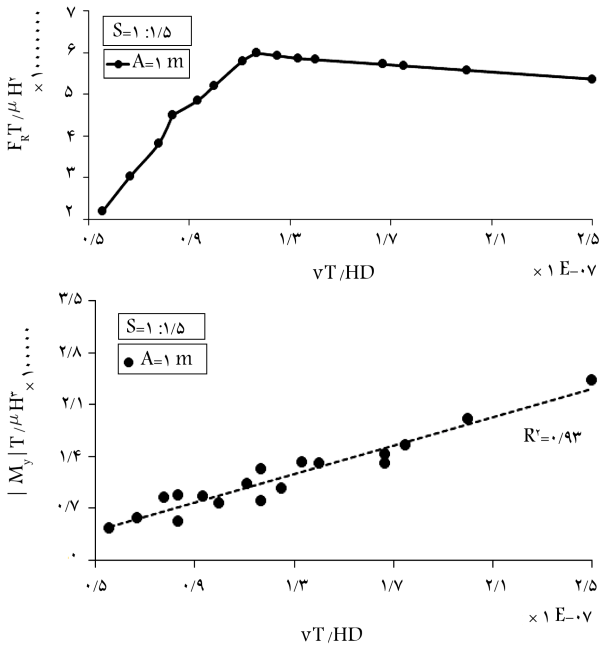


شکل ۷. تغییرات نیرو و لنگر بیشینه با پارامترهای موج، آرمور L۱.

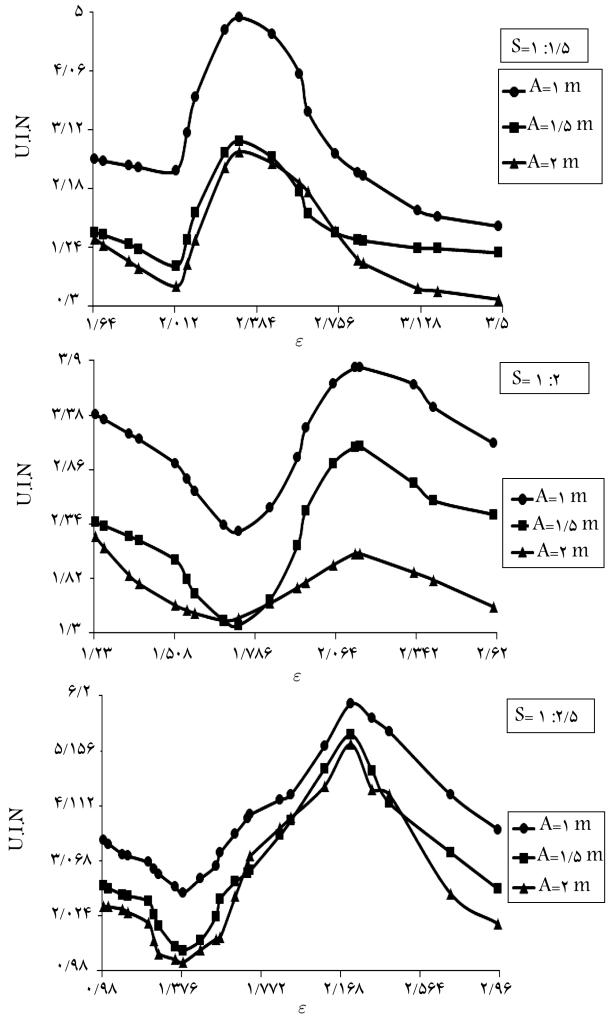
درنهایت تغییرات نیرو و لنگر بیشینه، برای آرمور L۳ (تراز بیشینه‌ی بالاروی موج) در شکل ۸ آمده است. اعداد بی‌بُعد به‌کاررفته با آرمور L۱ یکسان هستند و این دو آرمور به دلیل دوربودن از میدان فعالیت موج‌شکنا رفتار یکسانی از خود بروز داده‌اند.

۲.۳. ناپایداری برکنش

تغییرات U.I.N. برحسب ε برای آرمور L۲ در شکل ۹ رسم شده است. این شکل اثر شکست موج و قطر آرمور را در ناپایداری برکنش نشان می‌دهد. در این شکل مشاهده می‌شود که در محدوده‌های کوچکی، آرمور با طول ضلع m



شکل ۸. تغییرات نیرو و لنگر بیشینه با پارامترهای موج، آرمور L۳.



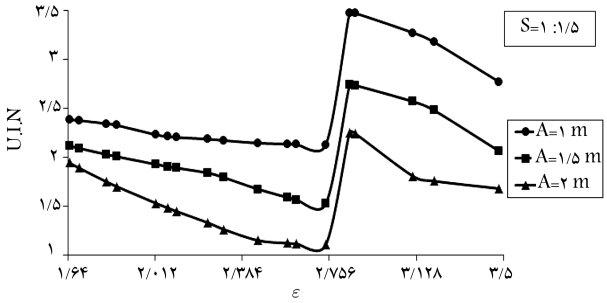
شکل ۹. تغییرات U.I.N. با پارامترهای موج، آرمور L۲.

$A = ۲$ ناپایداری برکنش بیشتری از $A = ۱/۵$ m دارد. در این حالات با افزایش طول ضلع، نیروهای موج و وزن قطعه‌ی آرمور بیشتر شده است، لیکن افزایش وزن، قادر به جبران ناپایداری افزایش‌یافته در اثر ازدیاد نیروهای موج نیست.

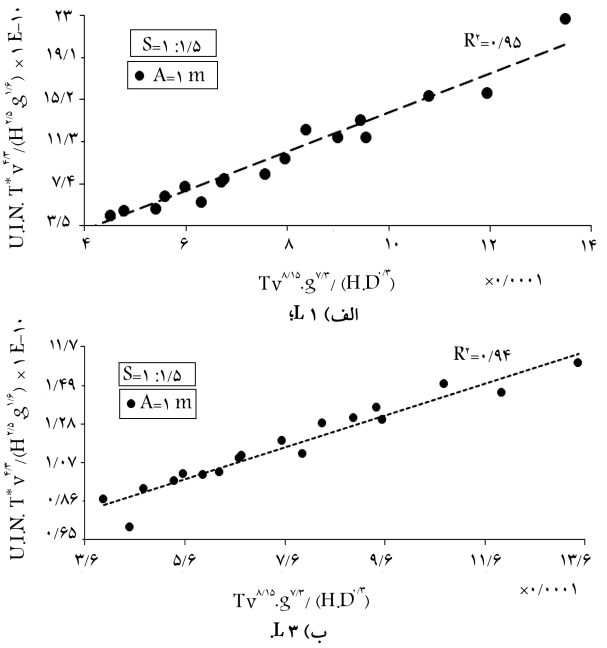
برای آرمور L۴، روند تغییر U.I.N. با عدد ایریبارن در شکل ۱۰ رسم شده است. برای این آرمور با افزایش قطر پایداری برکنش نیز افزایش یافته است.

مقادیر U.I.N. برای آرمورهای L۳ و L۱ برحسب پارامترهای موج در شکل ۱۱ نشان داده شده است. مطابق شکل مذکور پارامترهای موج با عدد بی‌بُعد دیگری غیر از ε نشان داده شده است.

مقایسه‌ی ناپایداری برکنش برای مکان‌های مختلف نشان می‌دهد که برای پارامترهای $S = ۱ : ۱/۵$، $D = ۱۰, ۱۵$ m، $A = ۱$ m در بیشتر ترکیبات و مجموع آن‌ها آرمورهای L۲، L۴، L۱ و L۳ به ترتیب بیشترین ناپایداری از نوع برکنش را دارند. به همین صورت، برای پارامترهای $S = ۱ : ۱/۵$، $D = ۱۰, ۱۵$ m، $A = ۱, ۵, ۲$ m آرمور L۴ ناپایداری برکنش بیشتری نسبت به آرمور L۲ دارد. موارد فوق در شکل ۱۲ آمده و برای پرهیز از تکرار، تمامی ترکیبات موج در این شکل نشان داده نشده است.



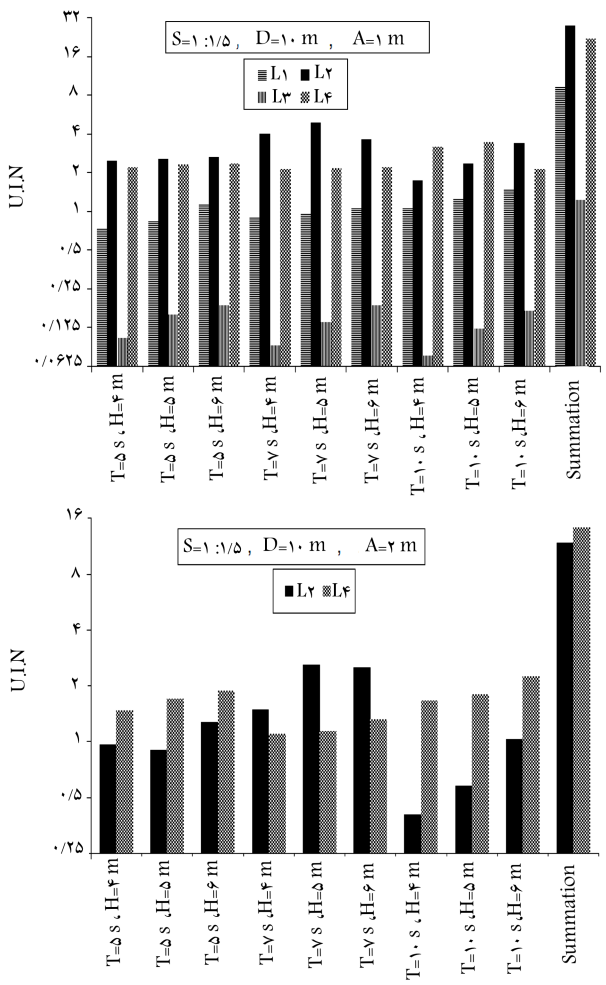
شکل ۱۰. تغییرات U.I.N. با پارامترهای موج، آرمور L۴.



الف) L۱؛

ب) L۳.

شکل ۱۱. تغییرات U.I.N. با پارامترهای موج، آرمورهای L۱ و L۳.



شکل ۱۲. مقایسه‌ی ناپایداری برکنش برای مکان‌های مختلف آرمور.

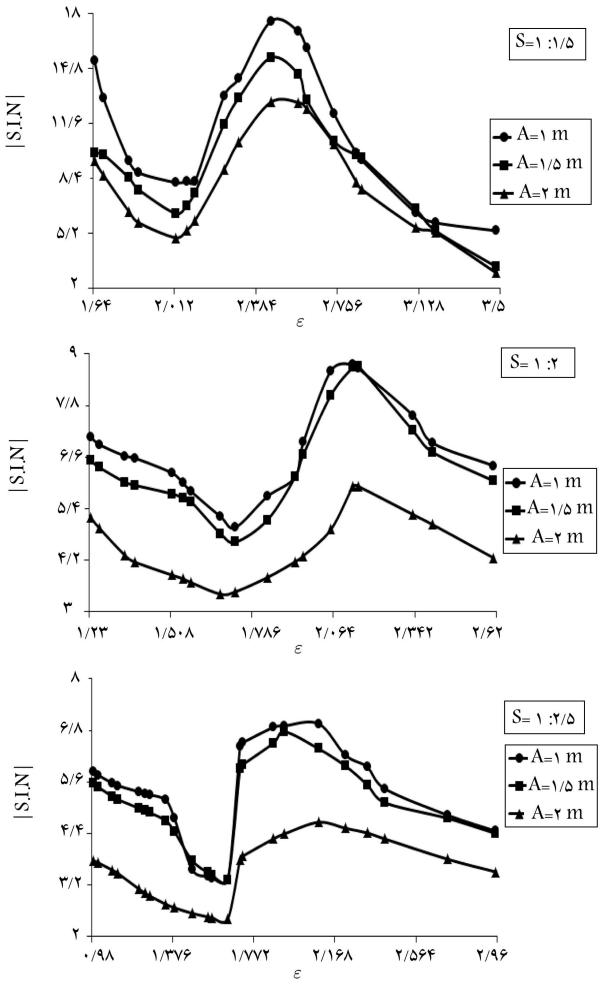
۳.۳. ناپایداری لغزشی

مود ناپایداری لغزشی توسط عدد |S.I.N.| (رابطه‌ی ۹) کمّی شده است. در این مود ناپایداری، ترکیبی از نیروی امواج، وزن آرمور و اصطکاک بین آرمور و بدنه‌ی موج‌شکن حاکم است. وزن آرمور به دو صورت نیروی پایدارکننده (تمایل حرکت آرمور به سمت تاج موج‌شکن) و ناپایدارکننده (تمایل حرکت آرمور به سمت پنجه‌ی موج‌شکن) عمل می‌کند.

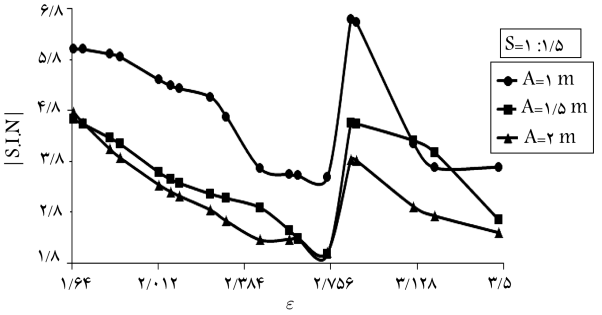
مقادیر |S.I.N.| بر حسب ε برای آرمور L۲ در شکل ۱۳ نشان داده شده است. مطابق شکل، در محدوده‌هایی از ε با افزایش قطر آرمور ناپایداری لغزشی افزایش می‌یابد. پدیده‌ی مذکور به این دلیل اتفاق افتاده است که نیروی اصطکاک بین آرمور و بدنه‌ی موج‌شکن قادر به غلبه بر نیروهای امواج و وزن افزایش یافته نیست.

تغییرات |S.I.N.| بر حسب پارامترهای موج برای آرمور L۴ در شکل ۱۴ رسم شده است. مطابق شکل در بیشتر حالات با افزایش قطر آرمور، پایداری لغزشی افزایش می‌یابد؛ لیکن خلاف این رفتار در محدوده‌هایی قابل مشاهده است، که دلیل آن در قسمت قبل توضیح داده شده است.

مقادیر |S.I.N.| برای آرمورهای L۱ و L۳ در شکل ۱۵ ارائه شده است. مقایسه‌ی پتانسیل لغزش مکان‌های مختلف آرمور برای همه‌ی ترکیبات موج نشان



شکل ۱۳. تغییرات |S.I.N.| با پارامترهای موج، آرمور L۲.

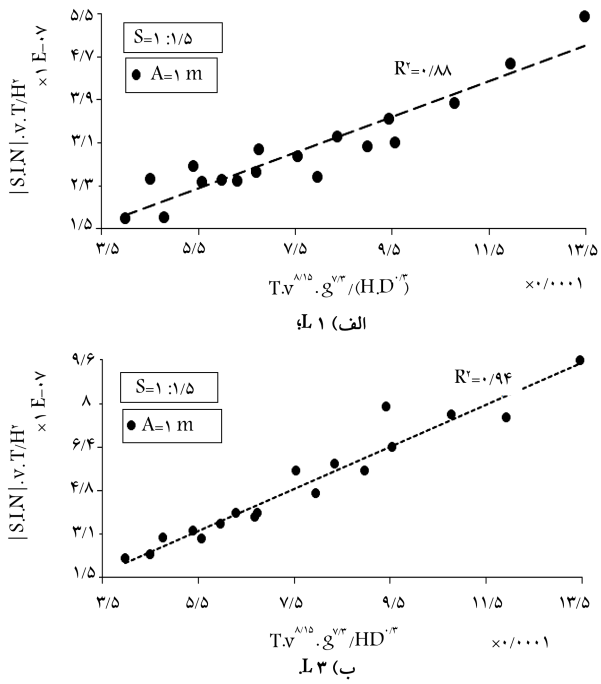


شکل ۱۴. تغییرات |S.I.N.| با پارامترهای موج، آرمور L۴.

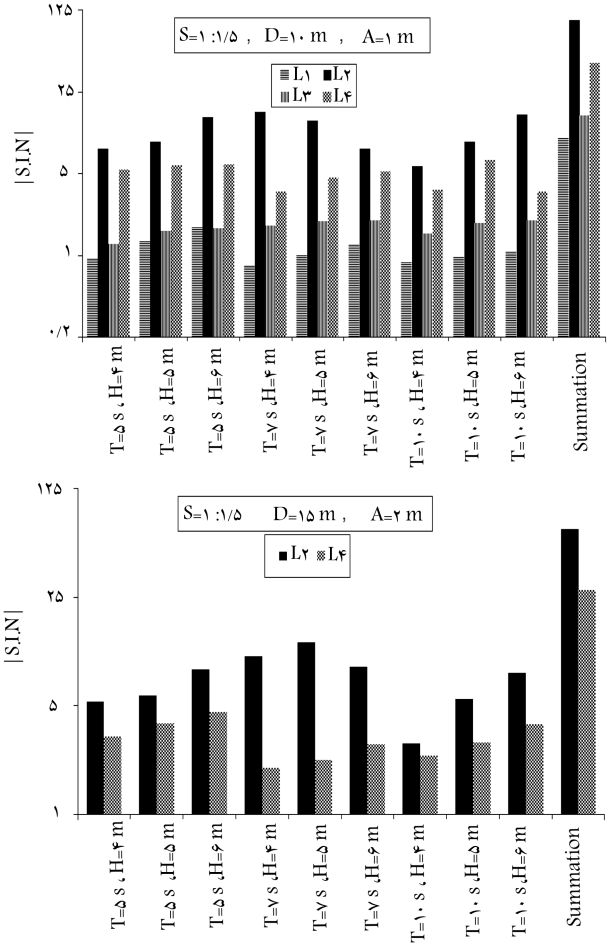
می‌دهد که آرمورهای L۲، L۴، L۳ و L۱ به ترتیب بیشترین ناپایداری لغزشی را دارند (شکل ۱۶).

۴.۳. ناپایداری چرخشی

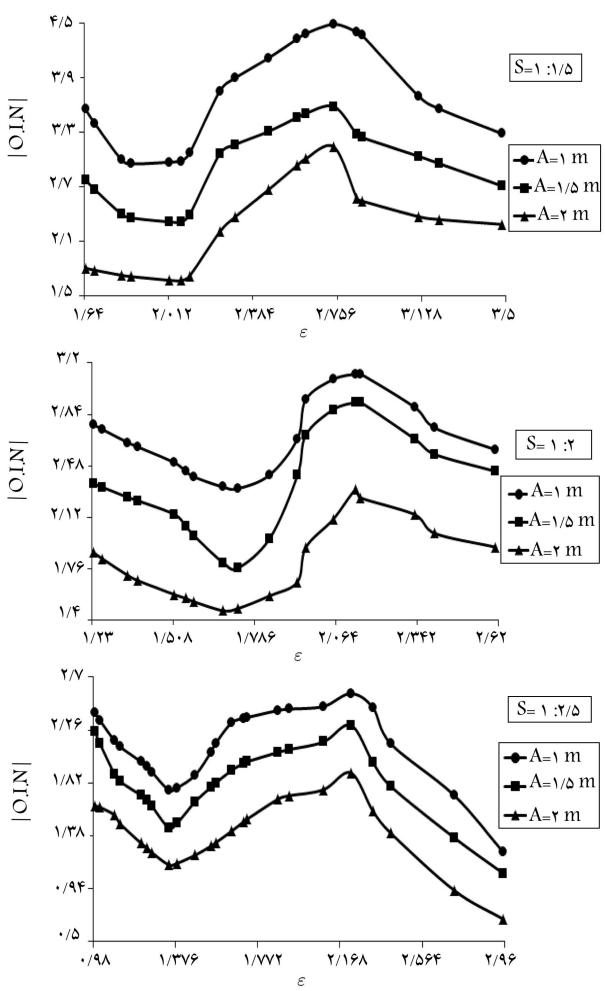
مود ناپایداری چرخشی توسط عدد|O.I.N.| (رابطه‌ی ۱۲) بیان می‌شود. وزن آرمور، نیروها و لنگر امواج در محاسبه‌ی این مود دخالت دارند. هر یک از مقادیر مزبور می‌توانند به‌عنوان عامل پایدار یا ناپایدارکننده نقش داشته باشند و لذا پیچیده‌ترین مود ناپایداری را تشکیل دهند.



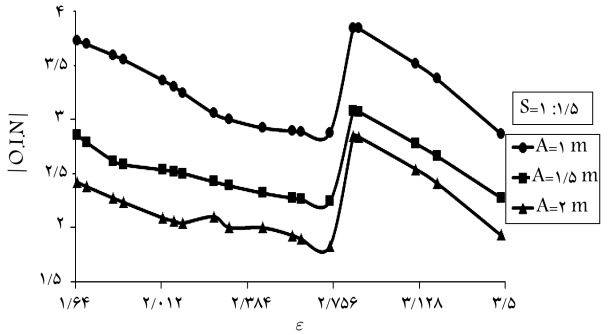
شکل ۱۵. تغییرات |S.I.N.| با پارامترهای موج، آرمورهای L۱ و L۳.



شکل ۱۶. مقایسه‌ی ناپایداری لغزشی برای مکان‌های مختلف آرمور.



شکل ۱۷. تغییرات |O.I.N.| با پارامترهای موج، آرمور L۲.

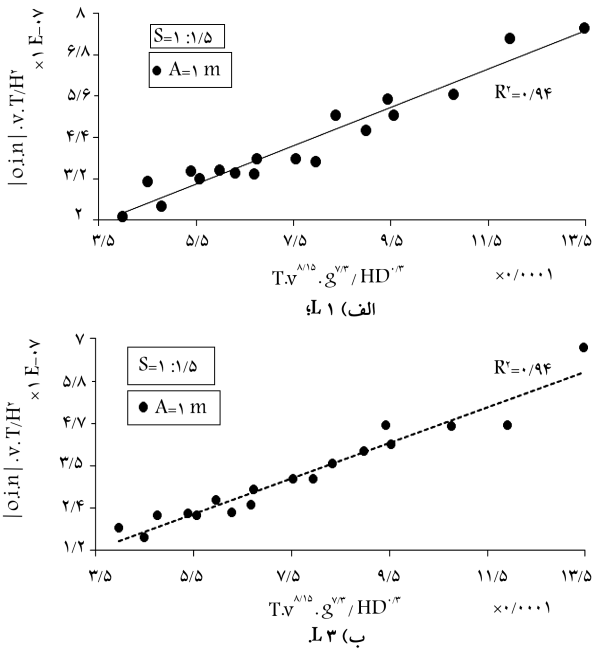


شکل ۱۸. تغییرات |O.I.N.| با پارامترهای موج، آرمور L۴.

تغییرات |O.I.N.| برحسب ε برای آرمور L۲ و شیب‌های مختلف در شکل ۱۷ نمایش داده شده است. مطابق شکل، برای هر سه شیب با افزایش قطر آرمور، همواره ناپایداری چرخشی کاهش می‌یابد.

مقادیر |O.I.N.| برای آرمور L۴ می‌تواند از شکل ۱۸ محاسبه شود. به طور مشابه با آرمور L۲ همواره افزایش قطر آرمور باعث کاهش ناپایداری چرخشی می‌شود.

مقادیر |O.I.N.| برای آرمورهای L۱ و L۳ در شکل ۱۹ آمده است. مقایسه‌ی مکان‌های مختلف آرمور از لحاظ ناپایداری چرخشی نشان می‌دهد که آرمورهای



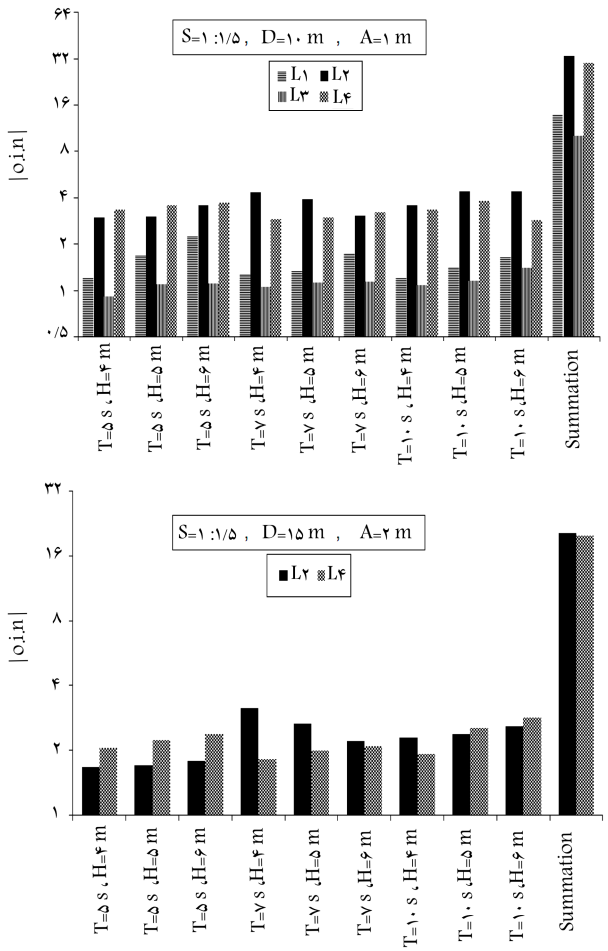
شکل ۱۹. تغییرات |O.I.N.| با پارامترهای موج، آرمورهای L۱ و L۳.

L۲، L۴، L۱ و L۳ به ترتیب بیشترین میزان ناپایداری چرخشی را به خود اختصاص می‌دهند (شکل ۲۰).

۴. نتیجه‌گیری

در این مطالعه، روشی جدید بر پایه‌ی آنالیز نیروهای وارده از سوی امواج برای ارزیابی پایداری آرمورهای موج‌شکن تاج‌بلند ارائه شده است. مقادیر نیرو و لنگر ناشی از امواج منظم بر آرمور در مکان‌ها و پارامترهای موج مختلف و همچنین بر پایه‌ی این مقادیر، اعداد ناپایداری برای سه مود برکنش، لغزش و چرخش توسط مدل عددی محاسبه شده است. این تذکر لازم است که نتایج اخذشده در این مطالعه، نتایج مقدماتی روش جدید ارائه شده بوده و لحاظ‌کردن اثر قفل و بست بین قطعات آرمور و همچنین شکل آرمور مطالعات بیشتری نیاز دارد، که نتایج حاصله در نوشتارهای دیگری ارائه خواهد شد. بررسی نتایج این مطالعه نشان داد که:

- طراحی لایه‌ی آرمور موج‌شکن بر پایه‌ی تحلیل نیروهای وارد بر آن در مقابل روش‌های تجربی و آزمایشگاهی می‌تواند به‌عنوان یک روش منطقی تلقی شود.
- برخلاف انتظار، افزایش ارتفاع موج لزوماً منجر به افزایش نیروهای وارد به امواج و درنتیجه افزایش قطر آرمور موردنیاز نمی‌شود. در حقیقت آنچه که در رفتار آرمور در برابر امواج برخوردی تاثیرگذار است، نوع شکست موج است. در امواج با شکست ریزشی با افزایش ارتفاع موج، نیروی وارد بر آرمور کاهش می‌یابد.
- در طراحی لایه‌ی آرمور باید به نوع شکست موج (لغزشی، شیرجه‌یی و ریزشی) توجه شود. عدد بی‌بُعد ایریبارن می‌تواند به‌عنوان یک پارامتر کلیدی برای بیان خصوصیات موج به‌کار رود.
- بحرانی‌ترین محل از لحاظ ناپایداری آرمور موج‌شکن تاج‌بلند، تراز آب متوسط و تراز بیشینه‌ی پایین‌روی موج است. لذا انتظار می‌رود خرابی لایه‌ی آرمور در حد فاصل این دو تراز رخ دهد. در نتیجه لازم است در مرحله‌ی ساخت توجه بیشتری به این منطقه معطوف شود.
- اعداد ناپایداری معرفی‌شده می‌توانند برای مقایسه‌ی مودهای ناپایداری برحسب تغییرات پارامترهای موج، مشخصات هندسی و محل‌های مختلف قرارگیری آرمور به‌کار روند.



شکل ۲۰. مقایسه‌ی ناپایداری چرخشی برای مکان‌های مختلف آرمور.

پانوشت‌ها

1. Hudson
2. van der Meer
3. plunging
4. surging

5. collapsing
6. Iribarren
7. black-box
8. low-crested breakwater
9. high-crested breakwater
10. Navier-Stokes
11. large eddy simulation
12. subgrid-scale
13. Smagorinsky
14. volume of fluid
15. uplift instability number
16. sliding instability number
17. overturning instability number

منابع (References)

1. U.S. Army Corps of Engineers, *Coastal engineering manual*, Engineer Manual 1110-2-1100, U.S. Army Corps of Engineers, Washington, (in 6 volumes) (2006).
2. Novak, P., Moffat, A.I.B., Nalluri, C. and Narayanan, R., *Hydraulic Structures*, 4th edition, Taylor and Francis, London, pp. 575-670 (2007).
3. Hudson, R.Y. "Laboratory investigations of rubble mound breakwaters", *Journal of Waterways, Harbors and Diversions*, **85**(3), pp. 93-121 (1959).
4. van der Meer, J.W. "Rubble mounds-recent modifications", *Handbook of Coastal Engineering*, **1**, Gulf Publishing, U.S.A., pp. 883-894 (1990).
5. Sigurdsson, G. "Wave forces on breakwater capstones", *Journal of Waterways and Harbors Division, ASCE*, **88**(3), pp. 27-59 (1962).
6. Mizutani, N., Iwata, K., Rufin, T.M. and Kurata, K. "Laboratory investigation on the stability of a spherical armor unit of a submerged breakwater", *Proceeding of the 25th International Association for Hydraulic Research*, pp. 1400-1413 (1993).
7. Pramono, W.T. "Wave forces on cubical armor units on submerged and low-crested breakwaters", Ph.D. thesis, University of Windsor (1997).
8. Mader, C.L., *Numerical Modeling of Water Waves*, 2nd edition, CRC Press, U.S.A. (2005).
9. Sawaragi, T., *Coastal Eengineering-Waves, Beaches, Wave-Structure Interactions*, Elsevier, Japan (1995).
10. Guanche, R., Losada, I.J. and Lara J.L. "Numerical analysis of wave loads for coastal structure stability", *Journal of Coastal Engineering*, **56**(5), pp. 543-558 (2009).
11. Hur, D.S. and Mizutani, N. "Numerical estimation of the wave force acting on a body on submerged breakwaters", *Journal of Coastal Engineering*, **47**(5), pp. 329-345 (2003).
12. Lo, E.Y.M. and Shao, S. "Simulation of near-shore solitary wave mechanics by incompressible SPH, LES and RANS methods", *Journal of Applied Ocean Research*, **24**, pp. 275-286 (2002).
13. Sarfaraz, M. "Numerical analysis of the stability of concrete armor layers in rubble-mound breakwaters due to sea wave attacks", M.S. thesis, Sharif University of Technology, Tehran, Iran (2012).
14. Minin, I.V. and Minin, O.V., *Computational Fluid Dynamics Technologies and Applications*, Janeza Trdine9, Croatia (2001).
15. Garnier, E., Adams, N. and Sagaut, P. "Large eddy simulation for compressible flows", Springer, London (2009).
16. Flow Science, FLOW-3D User's Manual Version 9.3 , Santa Fe, New Mexico (2008).
17. Rodi, W., *Turbulence Models and Their Application in Hydraulics*, 3rd edition, IAHR Monograph, Balkema, Rotterdam, The Netherlands (1993).
18. Paidousis, P.M., *Fluid- Structure Interactions*, Academic Press, U.S.A. (1998).
19. B.S., Falsework Performance Requirements and General Design, Code 12812, British Standards (2004).
20. Sturm, T.W., *Open Channel Hydraulics*, McGraw-Hill, U.S.A. (2001).