

آخرین مطالعات و دست آوردهای طراحی موج شکن های سکویی ایسلندی

مجید احسانی^۱، محمد نوید مقیم^۲، مهدی شفیعی فر^۳

۱- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان

۲- استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان

۳- استاد، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس

moghim@cc.iut.ac.ir

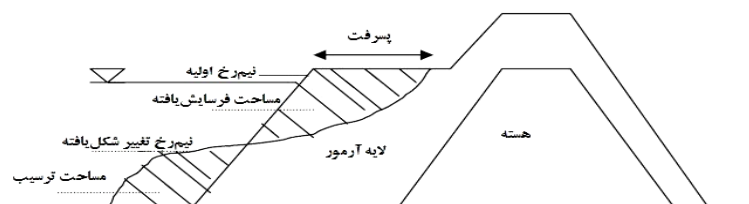
خلاصه

موج شکن سکویی نوعی موج شکن توده سنگی است که با ایجاد یک سکوی بزرگ در تراز بالاتر و یا هم تراز سطح ایستایی در سمت دریا ساخته شده و در طراحی آن از مصالح استخراجی از معدن قرضه استفاده حداکثری می شود. در گذشته قوانین طراحی واضحی برای طرح مقطعی کامل از موج شکن سکویی وجود نداشته و بیشتر بر اساس تجربه، طرح اولیه انجام می شد و مدل سازی آزمایشگاهی انجام می گرفت. در طراحی موج شکن های سکویی، پایداری هیدرولیکی و سرریزی موج دو بحث اثرگذار بشمار می روند. پارامترهای بسیاری بر طراحی موج شکن سکویی تأثیر گذارند که شناخت و بررسی تأثیر آن ها برای روشن شدن و تفهیم بهتر پایداری هیدرولیکی کمک شایانی می کند. در این مقاله با توجه به آخرین مطالعات موجود، مهمترین پارامترهای اثرگذار در پایداری هیدرولیکی مورد بررسی قرار گرفته و آخرین توصیه های طراحی برای همه پارامترهای طراحی حاکم بر پایداری هیدرولیکی موج شکن های سکویی مخصوصاً موج شکن سکویی ایسلندی ارائه می شود. همچنین بر اساس آخرین توصیه های طراحی، موج شکن سکویی ایسلندی به عنوان پروژه ای فرضی طراحی می شود.

کلمات کلیدی: موج شکن های سکویی ایسلندی، طراحی هندسی، پایداری هیدرولیکی، پارامترهای اثرگذار

۱. مقدمه

نخستین بار در اوایل سال ۱۹۸۰ میلادی زمانی که نیاز به احداث یک لایه محافظ شیب برای توسعه باند فرودگاه به سمت دریا در جزیره آلاسکا مطرح شد، ساخت یک موج شکن بر اساس شکل گیری طبیعی لایه آرمور و وجه جلویی موج شکن در طول برخورد امواج، مورد توجه بیشتری قرار گرفته است [1]. با قبول تفکر شکل پذیری در موج شکن های توده سنگی، با گذشت زمان قسمت فوقانی مقطع سازه موج شکن توده سنگی پس از تغییر شکل به سمت پایین در کف دریا ریخته شده و عملکرد سازه های تعیین کننده ای ندارد. لذا به منظور کاهش حجم مصالح مصرفی در ساخت موج شکن، قسمت فوقانی از نیم رخ اولیه سازه حذف گردید تا در نهایت لایه سنگی در جلوی مقطع دوزنقه ای شکل موج شکن توده سنگی، که شبیه به یک سکو بود در سمت رو به دریای موج شکن، باقی بماند. در واقع موج شکن سکویی نوعی موج شکن توده سنگی است، که با ایجاد یک سکوی تقریباً بزرگ در تراز بالاتر یا هم تراز سطح ایستایی (SWL) در سمت دریا ساخته می شود (شکل ۱). از مزایای موج شکن های سکویی نسبت به نوع سنتی این است که با ایجاد یک سکوی حجیم و متخلخل نزدیک سطح آب قسمت اعظم انرژی امواج در هنگام برخورد به سازه مستهلک شده و به پایداری سازه کمک خواهد نمود. در واقع هدف اصلی از طرح موج شکن سکویی ساخت یک سکو با جذب انرژی بالا، کاهش انعکاس موج و کم کردن سرریزی در دوره عمر مفید سازه می باشد.



شکل ۱- ساختمان موج شکن سکویی و طرح شماتیک پارامترهای مطرح در موج شکن سکویی

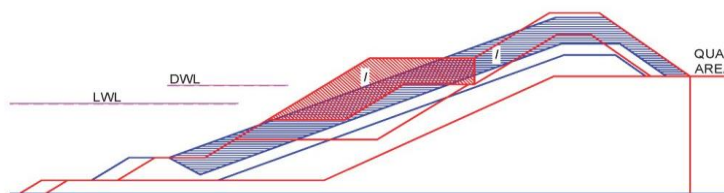
موج شکن های سکویی از لحاظ طراحی و اجراء به دو نوع موج شکن سکویی همگن^۱ و موج شکن سکویی چند لایه^۲ تقسیم بندی می شوند. در موج شکن سکویی همگن، لایه آرمور جلویی سازه فقط از یک نوع دانه بندی سنگ تشکیل شده و موج شکن های سکویی چند لایه از کلاس های متعدد سنگی تشکیل می شود. موج شکن های سکویی چند لایه به عنوان موج شکن های ایسلندی معروف هستند^۳، بطوری که استفاده از این نوع موج شکن ها در ایسلند همانطور که در جدول ۱ آمده بسیار مرسوم بوده و تاکنون بیش از ۲۰ مورد از آن ها در این کشور ساخته شده است [2]. در موج شکن سکویی نوع ایسلندی بزرگترین کلاس سنگ تحت عنوان سنگ کلاس I در قسمت بالای سکوی موج شکن و در برخی مواقع در قسمت فوقانی شیب جلوی سکو که موج برخوردی بیشترین اثر را دارد، قرار گرفته و نقش مهمی در پایداری سازه ایفا می کنند. کلاس های سنگ های کوچکتر در قسمت های پایینی شیب جلوی سکو و لایه های درونی موج شکن در جایی که تأثیر موج برخوردی کمتر است، قرار داده می شوند. عموماً این سنگ ها از همان سنگ های بکار رفته در موج شکن های سکویی شکل پذیر همگن هستند [3].

جدول ۱- موج شکن های سکویی ایسلندی که اخیراً ساخته شده [2]

نام پروژه	سال ساخت	ارتفاع مشخصه موج	سنگ کلاس I آرمور	پایین ترین تراز کلاس I	حجم کل مصالح	عمیق ترین قسمت مقطع
Husavik (Iceland)	2001-2002	6.8 m	16-30 ton	-1.0 m	270,000 m ³	-12 m
Grindavic (Iceland)	2001-2002	5.1 m	15-30 ton	-4.5 m	170,000 m ³	-5 m
Vopnafjorour (Iceland)	2003-2004	5.0 m	8-28 ton	-2.0 m	140,000 m ³	-9 m
Thorlakshofn (Iceland)	2004-2005	5.5 m	8-25 ton	-4.5 m	230,000 m ³	-5 m
Landeyjahofn (Iceland)	2008-2010	6.1 m	12-30 ton	-2.5 m	600,000 m ³	-9 m
Helguvik (Iceland)	2008-2010	5.0 m	15-25 ton	-2.0 m	350,000 m ³	-28 m

۲. مزیت های موج شکن سکویی چند لایه

با توجه به عملکرد استاتیکی موج شکن سکویی ایسلندی، مقایسه ای اقتصادی بین این نوع موج شکن با موج شکن سنتی استاتیکی انجام می شود. شکل ۲ مقایسه ای بین حجم بزرگترین سنگ دانه بکار رفته در کلاس I موج شکن ایسلندی و سنگ بکار رفته در لایه آرمور موج شکن سنتی را نشان می دهد. اگر بجای استفاده از موج شکن سنتی که لایه آرمور آن با رنگ آبی مشخص شده است، از نوع ایسلندی با بزرگترین سنگ دانه در کلاس I (با رنگ قرمز) استفاده گردد (مخصوصاً در حالت وجود ارتفاع موج مشخصه زیاد و متوسط)، در این حالت حجم استفاده از بزرگترین کلاس سنگ (کلاس I)، بطور قابل ملاحظه ای کاهش می یابد. از آنجایی که استفاده از بزرگترین کلاس سنگ هزینه بالایی دارد، در کل طراحی موج شکن ایسلندی می تواند اقتصادی تر باشد [2].



شکل ۲- مقایسه بزرگترین کلاس سنگ لایه آرمور در موج شکن ایسلندی و لایه آرمور موج شکن سنتی [2]

مقایسه موج شکن سکویی ایسلندی استاتیکی با موج شکن سکویی شکل پذیر نشان می دهد موج شکن ایسلندی دارای کلاس های مختلف سنگی است، بطوری که دانه بندی هر کلاس سنگی بصورت جداگانه و کم عرض انتخاب می شود. در موج شکن سکویی قابل تغییر شکل بدلیل استفاده از یک نوع کلاس سنگی در کل لایه آرمور با دانه بندی عریض، طیف وسیعی از اندازه سنگ ها در آن استفاده می شود. در این حالت سنگ های ریزتر در بین سنگ های بزرگتر قرار گرفته و خلل و فرج بین سنگ ها پر شده و نفوذ پذیری سازه متخلخل کم می شود. بنابراین انتخاب دانه بندی کم عرض در

¹ - Mass Armoured Berm Breakwater

² - Multi layer Berm Breakwater

³ - Icelandic Berm Breakwater

کلاس‌های سنگی لایه آرمور موج‌شکن ایسلندی نفوذپذیری بیشتری را نسبت به کلاس‌های آرمور با دانه‌بندی عریض در موج‌شکن تغییر شکل‌پذیر بوجود می‌آورد. نفوذپذیری بیشتر موج‌شکن سکویی ایسلندی، سبب افزایش جذب انرژی موج برخوردی، افزایش پایداری سازه، کاهش سرریزی و کاهش انعکاس موج (به دلیل جذب انرژی بیشتر) می‌گردد [4]. به منظور مقایسه مشخصات و عملکرد موج‌شکن سکویی شکل‌پذیر پایدار دینامیکی با موج‌شکن غیرقابل تغییر شکل پایدار استاتیکی (ایسلندی) جدول ۲، ارائه شده است.

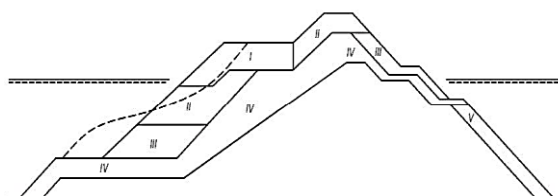
جدول ۲- مقایسه موج‌شکن‌های ایسلندی و شکل‌پذیر پایدار دینامیکی [5]

پایدار استاتیکی (ایسلندی)	پایدار دینامیکی
استفاده از چندین کلاس سنگ در لایه بیرونی سازه	استفاده از یک کلاس سنگ در لایه بیرونی سازه
آرمور همراه لایه‌های با دانه‌بندی متفاوت	آرمور همگن
بکارگیری دانه‌بندی کم عرض در هر لایه آرمور	بکارگیری دانه‌بندی عریض در لایه آرمور
نفوذپذیری زیاد	نفوذپذیری کم
سازه شکل‌ناپذیر	سازه شکل‌پذیر
اجازه حرکت کمتر سنگ‌دانه‌ها	حرکت مداوم سنگ‌دانه‌ها
شکست حداقلی سنگ‌دانه‌ها	شکست سنگ‌دانه‌ها
حجم کل مصالح کمتر	حجم کل مصالح بیشتر
جایابی گزینشی سنگ‌های ریخته شده	جایابی تصادفی سنگ‌های ریخته شده

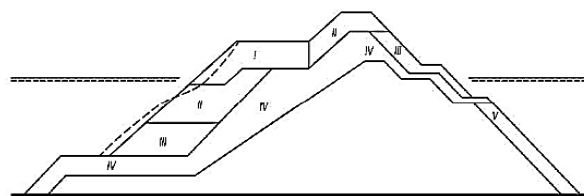
۳. طبقه‌بندی موج‌شکن سکویی

اخیراً طبقه‌بندی جدیدی برای موج‌شکن سکویی انجام شده که بین موج‌شکن سکویی ایسلندی و سکویی همگن تفاوت قائل می‌شود. طبقه‌بندی جدید بر اساس رفتار سازه‌ای موج‌شکن و همچنین تعداد کلاس سنگ بکار رفته در سازه است. در این حالت ابتدا بین موج‌شکن سکویی همگن با یک کلاس سنگ (MA) و موج‌شکن ایسلندی با چند کلاس سنگ (IC) تفاوت قائل شده و سپس رفتار این دو نوع موج‌شکن مورد بررسی قرار می‌گیرد. بدلیل آنکه ابعاد سنگ‌های استفاده شده در موج‌شکن نوع همگن کوچکتر از سنگ‌های مورد استفاده در موج‌شکن نوع ایسلندی هستند، موج‌شکن نوع همگن به سازه کاملاً شکل‌پذیر (FR) و نسبتاً شکل‌پذیر (PR) و موج‌شکن نوع ایسلندی به سازه به‌سختی شکل‌پذیر (HR) و نسبتاً شکل‌پذیر (PR) تقسیم‌بندی می‌شود. براساس نوع سازه و نوع تغییر شکل موج‌شکن سکویی، این موج‌شکن به چهار نوع زیر تقسیم شده است [6] (شکل ۳):

- ۱- موج‌شکن سکویی ایسلندی به‌سختی شکل‌پذیر^۱، که به اختصار HR-IC گفته می‌شود. (شکل ۳-الف)
- ۲- موج‌شکن سکویی ایسلندی نسبتاً شکل‌پذیر^۲، که به اختصار PR-IC گفته می‌شود. (شکل ۳-ب)
- ۳- موج‌شکن سکویی همگن نسبتاً شکل‌پذیر^۳، که به اختصار PR-MA گفته می‌شود. (شکل ۳-ج)
- ۴- موج‌شکن سکویی همگن کاملاً شکل‌پذیر^۴، که به اختصار FR-MA گفته می‌شود. (شکل ۳-د)

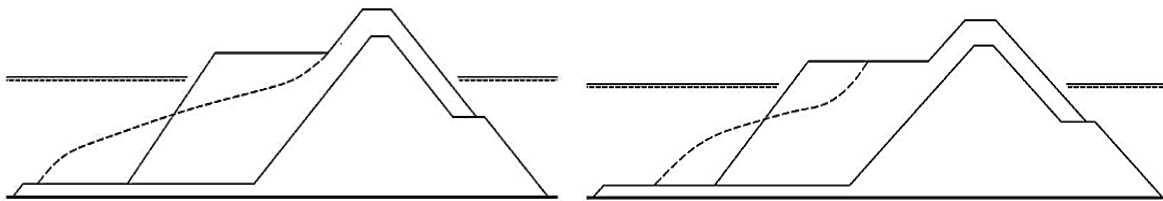


شکل ۳-ب - موج‌شکن سکویی ایسلندی نسبتاً شکل‌پذیر (PR-IC)



شکل ۳-الف - موج‌شکن سکویی ایسلندی به‌سختی شکل‌پذیر (HR-IC)

1 - Hardly Reshaping Icelandic Type Berm Breakwater
2 - Partly Reshaping Icelandic Type Berm Breakwater
3 - Partly Reshaping Mass Armoured Berm Breakwater
4 - Fully Reshaping Mass Armoured Berm Breakwater



شکل ۳-ج - موج شکن سکویی همگن نسبتاً شکل پذیر (PR-MA) شکل ۳-د - موج شکن سکویی همگن کاملاً شکل پذیر (FR-MA)

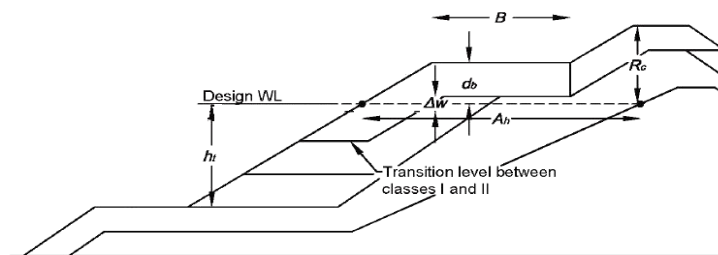
جدول ۳، دامنه تغییرات پارامترهای بی بعد عدد پایداری $(N_s = H_{SD} / \Delta D_{n50})$ ، پارامتر آسیب $(S_d = A_e / D_{n50}^2)$ و پسرقت عرض سکو بی بعد شده (Rec / D_{n50}) را برای انواع موج شکن سکویی بیان می کند، که در آن ارتفاع مشخصه موج، A_e مساحت فرسایش یافته، $(\Delta = \rho_s / \rho_w - 1)$ چگالی نسبی سنگ لایه آرمور، D_{n50} قطر متوسط و Rec پسرقت عرض سکو هستند.

جدول ۳- طبقه بندی موج شکن سکویی برای دوره بازگشت ۱۰۰ ساله [6]

نوع موج شکن	نشان اختصاری	$H_{SD} / \Delta D_{n50}$	S_d	Rec / D_{n50}
موج شکن سکویی ایسلندی به سختی شکل پذیر	HR-IC	۱/۷-۲	۲-۸	۰/۵-۲
موج شکن سکویی ایسلندی نسبتاً شکل پذیر	PR-IC	۲-۲/۵	۱۰-۲۰	۱-۵
موج شکن سکویی همگن نسبتاً شکل پذیر	PR-MA	۲-۲/۵	۱۰-۲۰	۱-۵
موج شکن سکویی همگن کاملاً شکل پذیر	FR-MA	۲/۵-۳	-----	۳-۱۰

۴. بررسی پارامترهای اثر گذار در طراحی انواع موج شکن های سکویی

با توجه به ماهیت پیچیده امواج در حین برخورد با سازه های دریایی، شناخت هر چه بیشتر مسائل مطرح در طراحی سازه های دریایی سبب می شود که طراحی بهینه تر و کارآمدتری در طول عمر مفید سازه انجام گیرد که با توجه به هزینه های بسیار زیاد طرح و اجرای سازه های دریایی، نباید به آسانی از آن گذر کرد. پارامترهای بسیاری بر طراحی موج شکن سکویی تأثیر گذارند که شناخت و بررسی تأثیر آن ها برای روشن شدن و تفهیم بهتر مسئله کمک شایانی می کند. از طرف دیگر پایداری هیدرولیکی، یکی از مهمترین مسائل در طراحی موج شکن های سکویی است. بطور کلی پایداری هیدرولیکی در موج شکن ها به مفهوم مقاومت مطلوب سازه در برابر بارهای هیدرودینامیکی وارده از طرف امواج دریا است. به همین منظور آخرین مطالعات و توصیه های طراحی در زمینه پارامترهای حاکم بر پایداری هیدرولیکی موج شکن های سکویی مخصوصاً موج شکن سکویی ایسلندی مورد بررسی قرار گرفته است. شکل ۴ شمایی از مهمترین پارامترهای هندسی موج شکن سکویی ایسلندی را نشان می دهد.



شکل ۴- معرفی پارامترهای هندسی موج شکن سکویی ایسلندی

۴-۱- پارامترهای محیطی (ارتفاع و پرپود موج)

در زمینه بررسی تأثیر ارتفاع و پرپود امواج مطالعات زیادی انجام گرفته است. ارتفاع و پرپود موج جزء عوامل محیطی بوده، که نقش بسیار مهم و تعیین کننده ای در بررسی پایداری هیدرولیکی ایفا می کنند. تمامی مطالعات در ارتباط با سازه های توده سنگی شیب دار، افزایش احتمال تخریب سازه توده سنگی از نوع استاتیکی و یا افزایش تغییر شکل سازه شکل پذیر در اثر افزایش ارتفاع و پرپود موج را نشان می دهند. انرژی موج، معرف قدرت و توانایی موج به منظور جابجایی سنگدانه ها است. از آنجایی که انرژی موج با توان دوم ارتفاع موج متناسب است، ارتفاع موج عامل بسیار مهمی در تعیین پایداری

و تغییر شکل سازه است [7]. همچنین با افزایش پریرود موج انرژی کل در واحد عرض موج که نسبت مستقیم با طول موج دارد افزایش یافته و احتمال ناپایداری سازه بیشتر می‌گردد. تحقیقات اولیه در زمینه فرسایش موج‌شکن‌های سکویی اثرات پریرود امواج را نادیده گرفته و فقط اثر ارتفاع امواج را بیان کردند و از این رو پراکندگی قابل توجهی در نتایج محققانی مانند Hall و Kao مشاهده شد [8]. بررسی آزمایشگاهی Van der Meer و Tørum نشان داد که پارامتر پریرود موج نقش مهمی در فرسایش شیب جلوی موج‌شکن سکویی شکل‌پذیر دارد و به همین دلیل تأثیر برابری برای ارتفاع و پریرود موج در نظر گرفته و پارامتر بی‌بعد $HoTo$ را برای پایداری ارائه کردند [9, 10]. مقیم و همکاران با استفاده از مطالعه آزمایشگاهی بر روی موج‌شکن سکویی شکل‌پذیر نشان دادند که تأثیر ارتفاع نسبت به پریرود امواج از مرتبه دوم بوده و با معرفی پارامتر بی‌بعد $Ho\sqrt{To}$ اثر ترکیبی ارتفاع و پریرود موج را بیان کردند [11].

۴-۲- ضریب دانه‌بندی مصالح

از پارامترهای مهم دیگر ضریب منحنی دانه‌بندی مصالح است که بواسطه تعریف پارامتر بی‌بعد ضریب منحنی دانه‌بندی ($f_g = \frac{D_{n85}}{D_{n15}}$) تعریف می‌شود، که در آن D_{n15} و D_{n85} به ترتیب معرف قطرهای متناظر با ۸۵٪ و ۱۵٪ در منحنی دانه‌بندی سنگ هستند. سنگ‌ها بر اساس f_g به سه دسته دانه‌بندی کم عرض ($f_g < 1.5$)، دانه‌بندی عریض ($1.5 < f_g < 2.5$) و دانه‌بندی بسیار عریض ($f_g > 2.5$) تقسیم می‌شوند [12]. جدول ۴ میزان تناژ بلوک سنگی مورد نیاز متناسب با ضریب منحنی دانه‌بندی، که توسط راهنمای سنگ اروپا ارائه شده را نشان می‌دهد [12].

جدول ۴- میزان تناژ بلوک سنگ مورد نیاز در هر کلاس بر حسب ضریب منحنی دانه‌بندی [12]

دانه‌بندی کم عرض ($f_g < 1.5$)		دانه‌بندی عریض ($1.5 < f_g < 2.5$)		دانه‌بندی بسیار عریض ($f_g > 2.5$)	
تناژ بلوک سنگی	f_g	تناژ بلوک سنگی	f_g	تناژ بلوک سنگی	f_g
$(15-20)t$	1.1	$(1-10)t$	2.0	$(100-1000)kg$	4.5
$(10-15)t$	1.1	$(1-6)t$	1.8	$(10-500)kg$	3.5
$(6-10)t$	1.2	$(100-1000)kg$	2.0	$(10-300)kg$	3.0
$(3-6)t$	1.3	$(10-60)kg$	1.8		
$(1-3)t$	1.4				
$(0.3-1)t$	1.5				

دانه‌بندی سنگ بر میزان فرسایش موج‌شکن سکویی اثرگذار بوده و کاهش در عرض دانه‌بندی سبب کاهش تغییر شکل می‌شود. در واقع با افزایش گستره دانه‌بندی، فضای خالی بین سنگ‌ها توسط سنگ‌های کوچک‌تر پر شده و در نتیجه انرژی کمتری از امواج زوال می‌یابند، و منجر به افزایش عرض فرسایش یافته سکو می‌شود. مطالعات Van der Meer, Hall و Kao از جمله تحقیقات در زمینه دانه‌بندی سنگ می‌باشند [7, 8]. همچنین موج‌شکن‌های سکویی ایسلندی عموماً دارای دانه‌بندی کم عرض هستند.

۴-۳- قطر مشخصه سنگ‌دانه

یکی دیگر از مهم‌ترین پارامترها در بررسی پایداری و تغییر شکل موج‌شکن‌های سکویی، قطر اسمی سنگ‌دانه‌های لایه آرمور (D_{n50}) است. Van der Meer در مورد تأثیر این پارامتر بر میزان تغییر شکل نیم‌رخ موج‌شکن شکل‌پذیر تحقیق کرد و بیان داشت که با افزایش قطر اسمی دانه‌های سنگی، میزان طول نیم‌رخ تغییر شکل یافته، کاهش خواهد یافت. دلیل این امر را می‌توان به افزایش وزن سنگ‌دانه‌ها در اثر بزرگ‌تر شدن قطر آن‌ها و در نتیجه افزایش نیروی مقاوم در برابر حرکت سنگ‌ها در اثر برخورد امواج دانست [9].

Van der Meer و Sigurdarson در نقطه نظری مقادیر تناژ متوسط مورد نیاز برای اعداد پایداری مختلف و ارتفاع موج طرح مختلف را بصورت جدول ۵، ارائه کردند. آن‌ها چگالی سنگ را ۲۶۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب و چگالی آب را ۱۰۳۰ کیلوگرم بر متر مکعب در نظر گرفتند. با کمک جدول ۵ و رابطه ۱ که در ادامه آمده می‌توان در مورد قطر مشخصه سنگ‌دانه توصیه اجرایی ارائه نمود [2].

$$D_{n50} = \left(M \frac{50}{\rho_s} \right)^{1/3} \quad (1)$$

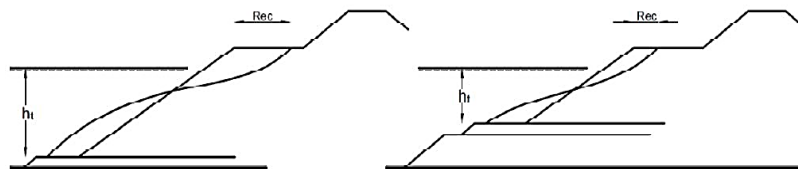
جدول ۵- مقادیر مورد نیاز جرم متوسط سنگ دانه [2]

عدد پایداری	$H_{SD} = 3m$	$H_{SD} = 5m$	$H_{SD} = 7m$
$H_{SD}/\Delta D_{n50} = 1.7$	$M_{50} = 3.5t$	$M_{50} = 16.2t$	$M_{50} = 44.3t$
$H_{SD}/\Delta D_{n50} = 2.0$	$M_{50} = 2.1t$	$M_{50} = 9.9t$	$M_{50} = 27.2t$
$H_{SD}/\Delta D_{n50} = 2.5$	$M_{50} = 1.1t$	$M_{50} = 5.1t$	$M_{50} = 13.9t$
$H_{SD}/\Delta D_{n50} = 3.0$	$M_{50} = 0.6t$	$M_{50} = 2.9t$	$M_{50} = 8.1t$

در مورد موج شکن سکویی ایسلندی توصیه شده که قطر اسمی متوسط کلاس II، 0.8 برابر قطر اسمی متوسط کلاس I انتخاب شود [13]. برای سنگ کلاس III توصیه‌ای موجود نیست ولی برای در نظر گرفتن تخمینی مناسب برای سنگ کلاس III، با بررسی اطلاعات مربوط به سنگ-دانه‌های موج شکن‌های سکویی ایسلندی‌ای که در دنیا اجرا شده مشخص شد که سنگ کلاس III، تقریباً 0.15 تا 0.4 برابر سنگ کلاس I می‌باشد. از طرفی با توجه به اینکه سنگ کلاس III کارکردی شبیه فیلتر برای موج شکن سکویی ایسلندی دارد، ایده دیگر این است که سنگ کلاس III همانند فیلتر طراحی شود.

۴-۴- عمق آب پای سازه

نتایج مطالعه آزمایشگاهی انجام شده توسط Burcharth و Lykke Andersen بر روی موج شکن سکویی شکل پذیر نشان می‌دهد که با افزایش عمق آب پای سازه میزان فرسایش نیم‌رخ سمت دریا و عرض فرسایش یافته سکو بیشتر می‌شود و کاهش عمق آب بیش از حد ($2.5 < \frac{h}{H_s}$) باعث شکست امواج و تغییر توزیع ارتفاع می‌گردد [14]. تأثیر عمق آب پای سازه نیز در شکل ۵ مشخص می‌باشد، بطوری که افزایش عمق آب پای سازه فرسایش عرض سکو را بیشتر خواهد کرد. یکی از مهمترین پارامترهایی که در انتخاب عمق آب پای سازه باید به آن دقت شود، نسبت عمق آب به طول موج است.



شکل ۵- تأثیر عمق آب پای سازه بر عرض فرسایش یافته سکو

۴-۵- تراز تاج (فاصله سکو تا تاج)

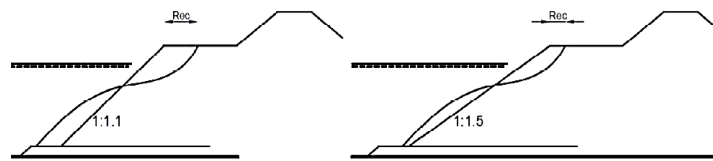
در انتخاب تراز تاج باید میزان بالاروی موج، عمق آب پای سازه و نشست احتمالی مشخص گردد. در پروژه‌های اجرا شده در ایران تراز تاج حدود ۳ تا ۵ متر بالاتر از تراز سکو در نظر گرفته شده است [15]. معمولاً توصیه شده که تراز تاج $(1-1.2)H_s$ از سطح ایستابی باشد [2]. توصیه اجرایی

$$\text{Sigurdarson و همکاران بصورت رابطه } \frac{R_c}{H_s} \times S_{op}^{1/3} = 0.35 \text{ برای موج شکن سکویی ایسلندی می‌باشد [13].}$$

همچنین عرض تاج حداقل بصورت ۴ برابر قطر متوسط سنگ استفاده شده در تاج پیشنهاد شده است.

۴-۶- شیب اولیه لایه آرمور (شیب بالا و پایین سکو)

هرچه شیب مقطع تندتر گردد، مصالح کمتری استفاده شده که این موضوع به اقتصادی تر بودن پروژه کمک می‌کند. البته شیب تندتر احتمالاً فرسایش را نیز بیشتر می‌کند و باید به این مسئله دقت شود (شکل ۶). شیب لایه هسته نیز با توجه به نوع اجرای هسته که معمولاً بصورت ریختن مصالح است و همچنین شیب لایه‌هایی که روی هسته اجرا شده، تعیین می‌شود. معمولاً به منظور کاهش هزینه‌های اجرای سازه موج شکن شیب اولیه موج شکن‌های سکویی بصورت شیب طبیعی مصالح ریخته می‌شود.



شکل ۶- تأثیر شیب بر مقدار عرض فرسایش یافته سکو

با توجه به اینکه در موج‌شکن‌های سکویی شکل‌پذیر، تغییر شکل موج‌شکن بعد از برخورد موج مورد نظر می‌باشد، در نتیجه شیب قسمت پایینی سکو به منظور کاهش حجم مصالح مصرفی و در نتیجه کاهش هزینه اجرای سازه می‌تواند شیب تندی در نظر گرفته شود. لذا بهتر است شیب طبیعی مصالح در زیر آب، به عنوان شیب بخش پایینی سکو منظور گردد. با توجه به نوع سنگ‌های موجود در بیشتر سواحل ایران در بیشتر پروژه‌ها این شیب ۱:۱/۲۵ در نظر گرفته شده است.

شیب بخش بالایی سکو باید حداقل برابر شیب طبیعی مصالح انتخاب شود. با توجه به نوع سنگ‌های موجود در بیشتر سواحل ایران و نیز مسائل اجرایی در بیشتر پروژه‌ها این شیب برابر ۱:۱/۵ در نظر گرفته شده است. هر چه شیب انتخابی برای این قسمت از سازه، تندتر در نظر گرفته شود، در انتخاب حاشیه امنیت که در قسمت انتخاب عرض سکوی مناسب نسبت به عرض فرسایش یافته سکو مطرح می‌گردد، بایستی توجه بیشتری نمود.

۴-۷- ارتفاع سکو از تراز ایستایی

افزایش ارتفاع سکو از سطح ایستایی از یک طرف منجر به افزایش حجم مصالح مصرفی و در نتیجه افزایش هزینه اجرای سازه خواهد شد. از طرف دیگر افزایش ارتفاع سکو منجر به کاهش عرض فرسایش یافته سکو و در نتیجه کاهش عرض سکوی اولیه برای حصول پایداری سازه موج‌شکن سکویی (کاهش حجم مصالح مورد نیاز برای احداث سازه) می‌شود. لذا در طراحی موج‌شکن سکویی باید مقدار بهینه‌ای برای ارتفاع سکو پیدا کرد که ضمن برقراری پایداری سازه مورد نظر، حجم مصالح مورد نیاز برای ساخت سازه کمترین مقدار ممکن را داشته باشد. در ضمن این تراز باید به گونه‌ای انتخاب شود که هم امکان اجرای با کیفیت خوب فراهم شود و هم در طول زمان بهره‌برداری بتوان به آسانی سکو را مورد بازدید قرار داد. البته Sigurdarson و Van der Meer در مورد موج‌شکن سکویی ایسلندی بیان کردند که تراز سکو نباید از یک حد نهایی بیشتر باشد، بطوری که بعد از این حد، افزایش تراز سکو تأثیر زیادی بر روی کاهش پسرفت عرض سکو ندارد. همچنین آن‌ها توصیه کردند که تراز سکو حداقل به اندازه $0.6H_s$ بالاتر از تراز ایستایی قرار گیرد [16]. در تحقیق مقیم و همکاران مشاهده می‌شود که ارتفاع سکو از تراز سطح ایستایی پارامتر مؤثری در پایداری و میزان تغییر شکل موج‌شکن سکویی است، بطوری که با افزایش ارتفاع سکو در یک شرایط موج ثابت، مقدار عرض سکوی فرسایش یافته کمتر می‌شود [11].

۴-۸- اثر عرض سکو

عرض سکو باید به گونه‌ای انتخاب شود که تغییر شکل سکو جهت رسیدن به حالت پایدار، پایداری قسمت‌های دیگر را تحت تأثیر قرار نداده و باعث تخریب سایر قسمت‌ها بخصوص شیب بالای سکو نگردد. عرض بهینه برای موج‌شکن سکویی شکل‌پذیر عرضی است که موج‌شکن دارای کمترین حجم ممکن باشد به شرط آنکه برای موج طراحی با دوره بازگشت مورد نظر، پس از تغییر شکل پوزه سکو و در حالت حد نهایی به اندازه $2D_{n50}$ تا $4D_{n50}$ از لبه انتهایی سکو، سنگ تخریب نشده باقی بماند [17]. Sigurdarson و همکاران مقدار عرض سکو را $3/5$ برابر ارتفاع موج مشخصه پیشنهاد کردند [13].

در آخرین قوانین مطرح شده مربوط به طراحی عرض سکو از طبقه‌بندی جدید استفاده شده است. برای این منظور ابتدا باید پارامتر انعطاف‌پذیری^۱ (P) با توجه به میزان خطرپذیری کارفرما و طراح تعیین شود [2]. پارامتر انعطاف‌پذیری به معنای قابلیت مقابله با بدترین شرایط دریایی می‌باشد. انعطاف‌پذیری موج‌شکن سکویی با افزایش عدد پایداری H_o کاهش می‌یابد، بطوری که موج‌شکن سکویی به سختی شکل‌پذیر، نسبت به بدترین شرایط دریایی دارای بیشترین انعطاف‌پذیری بوده و موج‌شکن سکویی نسبتاً شکل‌پذیر دارای انعطاف‌پذیری خوب و موج‌شکن سکویی کاملاً شکل‌پذیر دارای کمترین انعطاف‌پذیری نسبت به شرایط حدی می‌باشد. در جدول ۶ مقادیر پیشنهادی میزان انعطاف‌پذیری برای انواع موج‌شکن‌های سکویی ارائه شده است [2]:

¹ - Resiliency

جدول ۶- مقادیر پیشنهادی میزان انعطاف پذیری برای انواع موج شکن های سکویی [2]

موج شکن سکویی ایسلندی به سختی شکل پذیر	انعطاف پذیری بیشینه	P% = 10 - 20 %
موج شکن سکویی ایسلندی و همگن نسبتاً شکل پذیر	انعطاف پذیری متوسط	P% = 20 - 40 %
موج شکن سکویی همگن کاملاً شکل پذیر	انعطاف پذیری کمینه	P% ≤ 70 %

سپس مقدار عرض فرسایش یافته بصورت رابطه ۲ تعریف می شود:

$$\text{Rec}/D_{n50} = 1.6(H_s/\Delta D_{n50} - 1)^{2.5} \quad (2)$$

نهایتاً توصیه شده که مقدار مورد نیاز برای عرض سکو از رابطه ۳ بدست آید:

$$B = \text{Rec} / (P\% / 100) \quad (3)$$

همچنین کمترین مقدار عرض سکو نیز بصورت رابطه زیر پیشنهاد شده است:

$$B_{\min} = \text{Rec} + 1D_{n501} \quad \text{with a minimum of at least } 3D_{n501} \quad (4)$$

۹-۴- ناحیه گذر از سنگ کلاس I به سنگ کلاس II

با توجه به آنکه در ساخت موج شکن سکویی ایسلندی سنگ کلاس I باید طوری در قسمت های بالایی سازه جایابی شود که تحت اثر برخورد مستقیم موج پایداری خود را حفظ نموده و سنگ های کوچکتر در ترازهای پایین تر سازه بتوانند پایدار بمانند، ناحیه گذر از سنگ کلاس I به سنگ کلاس II (فاصله نقطه تقاطع نیم رخ تغییر شکل یافته و نیم رخ اولیه نسبت به تراز سطح ایستابی)، از جمله پارامترهای مهم در طراحی موج شکن سکویی ایسلندی خواهد بود. Sveinbjörnsson با مطالعه آزمایشگاهی ضوابط طراحی ای به منظور یافتن نقطه گذر از سنگ کلاس I به سنگ کلاس II ارائه کرد [4]:

۱- عمق سنگ کلاس I به اندازه بیشترین مقدار بین دو مقدار $1.45\Delta \times D_{n50I}$ و $1.85\Delta \times D_{n50II}$ در زیر سکو ادامه یابد.

۲- عمق سنگ کلاس II حداقل پایین تر از نقطه برخورد بین نیم رخ اولیه و نیم رخ تغییر شکل یافته باشد.

همچنین Sigurdarson و Van der Meer پیشنهاد کردند که ناحیه گذر تحت هیچ شرایطی نباید وارد کلاس II گردد. برای این منظور

ناحیه گذر از سنگ کلاس I به سنگ کلاس II را $2/65$ برابر قطر متوسط سنگ کلاس I و یا $0/4$ برابر ارتفاع مشخصه موج زیر تراز سکو پیشنهاد کردند [2].

۱۰-۴- فاصله افقی آرمور (فاصله افقی محل برخورد تراز آب تا هسته)

این پارامتر در طراحی موج شکن سکویی ایسلندی مطرح بوده و از آنجا که در بخش عمده ای از فاصله افقی آرمور سنگ های بزرگ و با تخلخل زیاد قرار دارند ظرفیت اتلاف در این قسمت بالا بوده و در نتیجه پارامتر مهمی در طراحی موج شکن سکویی ایسلندی محسوب می شود. برای طراحی فاصله افقی آرمور رابطه زیر پیشنهاد شده است [18]:

$$A_h/H_{SD} = 2H_{SD}/\Delta D_{n501} \quad (5)$$

علاوه بر رابطه ۵، فاصله افقی آرمور برای موج شکن های به سختی شکل پذیر $3/4$ تا 4 برابر ارتفاع مشخصه موج، برای موج شکن های نسبتاً شکل پذیر 4 تا 5 برابر ارتفاع مشخصه موج و برای موج شکن های کاملاً شکل پذیر 5 تا 6 برابر ارتفاع مشخصه موج پیشنهاد شده است [18].

۱۱-۴- طراحی پنجه

در برخی شرایط لازم است برای جلوگیری از آبهستگی و فرسایش مصالح بستر در قسمت جلوی موج شکن، یک لایه سنگ بصورت پنجه طرح گردد. یکی از پارامترهایی که در طراحی پنجه باید لحاظ شود فاصله پنجه از تراز ایستابی (h_t) است. رابطه ۶ برای محاسبه فاصله پنجه از تراز ایستابی بکار می رود [2]:

$$H_s/\Delta D_{n50} = \left\{ 2 + 6.2 \left(\frac{h_t}{d} \right)^{2.7} \right\} N_{od}^{0.15} \quad (6)$$

که در آن d عمق آب در پای سازه، h_t فاصله پنجه از تراز ایستابی و N_{od} تعداد سنگ های حرکت داده شده از روی پنجه هستند.

مقدار N_{od} با در نظر گرفتن جنبه‌های پایداری و اقتصادی و اجرایی برای پروژه‌های مختلف بصورت زیر توصیه شده است:

- ۰/۵ تا ۱ برای پروژه‌های بسیار مهم
- ۱ تا ۱/۵ برای پروژه‌های مهم
- ۱/۵ تا ۲/۵ برای پروژه‌های معمولی
- ۲/۵ تا ۳/۵ برای پروژه‌های کم اهمیت

همچنین برای تعیین تناژ پنجه می‌توان از رابطه ۷ استفاده نمود [19]:

$$\frac{H_s}{\Delta D_{n50}} = \left\{ 1.1 + 3.3S_m + 0.15 \frac{h_t}{D_{n50}} \right\} N_{od}^{0.2} \quad (7)$$

که در آن $S_m = \frac{2\pi H_s}{gT^2}$ تیزی موج است.

۴-۱۲- لایه هسته

برای اجرای لایه هسته موج‌شکن سکویی معمولاً از مصالح ریزدانه معدن قرصه استفاده می‌شود. همچنین عرض فوقانی هسته باید به اندازه‌ای در نظر گرفته شود که ملزومات اجرایی و نیز بهره‌برداری از تاج را جوابگو باشد و تردد دو کامیون از کنار هم بصورت رفت و برگشت یا یک کامیون از کنار جرثقیل امکان‌پذیر باشد. در خصوص انتخاب تراز هسته باید در نظر داشت که بدلیل اجرای هسته از خشکی، تراز هسته باید به گونه‌ای انتخاب شود که امکان تردد ماشین‌آلات برای اجرای هسته فراهم شود [15].

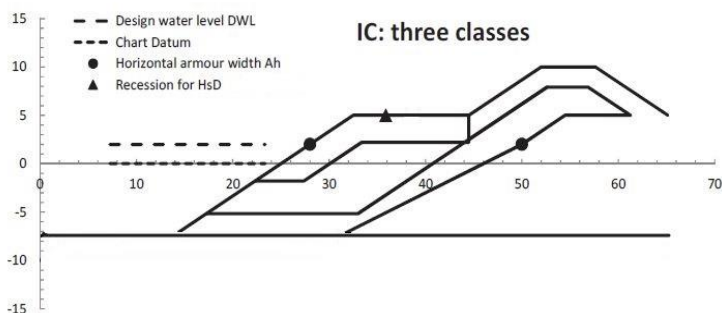
۵. مثالی از طراحی هندسی موج‌شکن سکویی ایسلندی

در این بخش مثالی از نحوه طراحی هندسی موج‌شکن سکویی ایسلندی، با توجه به توصیه‌های که در بخش قبلی ذکر شده، انجام می‌شود. برای این منظور فرض بر آن است که در پروژه‌ای ارتفاع مشخصه موج برای دوره بازگشت ۱۰۰ ساله برابر با ۵ متر و پررود اوج ۱۰/۲ ثانیه در نظر گرفته شده است. همچنین چگالی آب 1025 kg/m^3 و چگالی سنگ 2700 kg/m^3 در نظر گرفته شده است. در طراحی هندسی ابتدا باید نوع موج‌شکن با استفاده از طبقه‌بندی ارائه شده در جدول ۳ و بر اساس عدد پایداری مشخص شود. برای این منظور با توجه به ارتفاع مشخصه موج و با استفاده از جدول ۵، تناژ متوسط کلاس I انتخاب شده و سپس از رابطه ۱، قطر مشخصه سنگ کلاس I مشخص می‌شود. حال عدد پایداری بدست آمده و نوع موج‌شکن تعیین می‌شود. همچنین در طراحی موج‌شکن سکویی ایسلندی، عمدتاً از ۳ تا ۵ کلاس سنگ، بنا به شرایط معدن قرصه استفاده می‌شود که طراحی حاضر بر اساس سه کلاس سنگ انجام گرفته است. طراحی تمامی پارامترهای هندسی بصورت خلاصه در جدول ۷ بیان شده است. همچنین ایده اصلی مقطع طراحی شده در شکل ۷ از طرح اجرا شده‌ی موج‌شکن سکویی ایسلندی Sirevag در کشور نروژ گرفته شده است. مقادیر مشخص شده در این جدول که داخل پرانتز قرار گرفته‌اند، مقادیر فرضی در طراحی مثال اخیر است.

جدول ۷- خلاصه طراحی پارامترهای مختلف موج‌شکن سکویی ایسلندی

پارامتر مورد بررسی	مقدار بدست آمده	ملاحظه
تیزی موج	0.03	$S_m = \frac{2\pi H_s}{gT^2}$
چگالی نسبی	1.63	$\Delta = \frac{\rho_s}{\rho_w} - 1$
تناژ متوسط کلاس I	7.5 t	جدول ۵
قطر مشخصه کلاس I	1.41 m	رابطه ۱
عدد پایداری	$H_o = 2.18$	$H_o = \frac{H_{sd}}{\Delta D_{n50}}$
نوع موج‌شکن	نسبتاً شکل‌پذیر	جدول ۳
تعداد کلاس سنگ	3	معمولاً بین ۳ تا ۵ کلاس سنگ انتخاب می‌شود
مقدار عرض فرسایش یافته	3.38 m	رابطه ۲

مقدار خطر پذیری طراح	30 %	جدول ۶
عرض سکو	11.26 (12) m	رابطه ۳
تراز سکو از سطح ایستابی	5 m	$d_b \geq 0.6H_s$
فاصله عرض افقی آرمور	21.8 (22) m	رابطه ۵
تراز تاج	10 m	۳ تا ۵ متر بالاتر از تراز سکو
ناحیه گذر از سنگ کلاس I به سنگ کلاس II	-2 (-1.8) m	$0.4H_{SD}$



شکل ۷- مقطع طراحی شده موج شکن سکویی ایسلندی

۶. نتیجه گیری

پایداری هیدرولیکی موج شکن های سکویی از جمله مسائلی است که بدلیل پیچیدگی های فراوان نیازمند مطالعات پایه و اساسی است. پیچیدگی هایی از قبیل اندرکنش امواج تابشی با یک سازه متخلخل که در پاره ای مواقع بصورت امواج شکسته با تولید آشفتگی اثر می گذارد، از نظر تحلیلی و تئوری بسیار مشکل است. به همین منظور شناخت پارامترها و نحوه اثر آنها بسیار مهم و شایان توجه است. شناخت قوانین مطرح در طراحی موج شکن سکویی ایسلندی با توجه به مزیت های بسیار و جدید بودن، در این مقاله مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین با توجه به توصیه های طراحی ذکر شده موج شکن سکویی ایسلندی، با صورت پروژه فرضی نمونه طراحی شده است. پارامترهای محیطی مانند ارتفاع و پرریود موج و عمق آب پای سازه، پارامترهای سازه ای مانند قطر اسمی سنگ و ضریب منحنی دانه بندی، شیب اولیه لایه آرمور، تراز سکو از سطح ایستابی، عرض سکو، فاصله نقطه تقاطع نیم رخ تغییر شکل یافته و نیم رخ اولیه نسبت به تراز سطح ایستابی و فاصله افقی لایه آرمور از جمله پارامترهای مهم در بررسی پایداری هیدرولیکی موج شکن های سکویی هستند. بطور کلی با افزایش تمامی پارامترهای محیطی نامبرده عرض فرسایش یافته سکو بیشتر می شود. کاهش در عرض دانه بندی و یا افزایش قطر اسمی سنگ دانه سبب کاهش عرض فرسایش یافته سکو می شود. شیب تندتر، تراز سکو کمتر و عرض سکو کمتر سبب افزایش در میزان فرسایش سکو می شوند.

۷. مراجع

- Baird, W.F. and Hall, K.R. (1984). The Design of Breakwaters Using Quarried Stone, *19th International Conference On Coastal Engineering*, Houston, pp. 1024-1031.
- Sigurdarson, S. and Van der Meer, J.W. (2016). *Design and Construction of Berm Breakwaters*, World Scientific Press.
- Sigurdarson, S. Viggosson, G. Benediktsson, S. and Smarason O.B. (1996). Berm Breakwaters, Tailor-Made Size Graded Structure, *11th International Harbour Congress*, Antwerp, Belgium.
- Sveinbjornsson, P. I. (2008). *Stability of Iceland type berm breakwaters*, MSc Thesis, Faculty of Civil Engineering and Geosciences Department of Hydraulic Engineering, Delft University of Technology Netherlands.
- Sigurdarson, S. Jacobsen, A. Benediktsson, S. Smarason O.B. Björdar, S. Viggosson, G. Urrang, C. and Tørum, A. (2003). Sirevåg Berm Breakwater, design, construction and experience after design storm, *Coastal Structures*, pp. 1212-1224.

6. Sigurdarson, S. and Van der Meer, J.W. (2013). Design of berm breakwaters, recession, overtopping and reflection. *Proceedings of Coasts, Marine Structures and Breakwaters*, pp.18-20.
7. Van der Meer, J.W. and Koster, M.J. (1988). *Application of Computational Model on Dynamic Stability*, Proc. Breakwaters' 88, Eastaburne, Thomas Telford.
8. Hall, K. and Kao, S. (1991). A Study of the Stability of Dynamically Stable Breakwaters, *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol. 18, pp.916-925.
9. Van der Meer, J.W. (1992). *Berm Breakwaters*, Report No. 470, Delft Hydraulics.
10. Tørum, A. (1998). On the Stability of Berm Breakwaters in Shallow and Deep Water, *Proc. Of the 26th International Conference on Coastal Engineering*, Copenhagen, Denmark, ASCE.
11. Moghim, M.N., Shafieefar, M., Tørum, A. and Chegini, V. (2011). A new formula for the sea state and structural parameters influencing the stability of homogeneous reshaping berm breakwaters. *Coastal Engineering*, 58(8), pp.706-721.
12. CUR/CIRIA, 2007. *The Rock Manual. The Use of Rock in Hydraulic Engineering*. (2nd Edition). C683, CIRIA, London.
13. Sigurdarson, S. Van Der Meer, J.W. Burcharth, F. and Sørensen, J.D. (2007). Optimum safety levels and design rules for the Icelandic-type berm breakwater. *The International Conference of Coastal Structures*, pp. 53-64.
14. Andersen, T.L. and Burcharth, H.F. (2010). A new formula for front slope recession of berm breakwaters. *Coastal Engineering*, 57(4), pp.359-374.
۱۵. آیین نامه طراحی موج شکن های سکویی شکل پذیر، سازمان بنادر و دریا نوردی، اداره کل مهندسی سواحل و بنادر.
16. Sigurdarson, S. and Van der Meer, J.W. (2013). Design of berm breakwaters, recession, overtopping and reflection. *Proceedings of Coasts, Marine Structures and Breakwaters*, pp.18-20.
17. Sigurdarson, S. and Van der Meer, J.W. (2013). Design of berm breakwaters, recession, overtopping and reflection. *Proceedin* Sigurdarson, S. Viggosson, G. Tørum, A. and Smarason, O.B. (2001). Stable berm breakwaters. *International Workshop on Advanced Design of Maritime Structures in the 21st Century*, PHRI, Japan.
18. Van Der Meer, J. W. and Sigurdarson, S. (2014). Geometrical design of berm breakwaters. *Coastal Engineering Proceedings*, 1(34), 25.

The latest researches and accomplishments in the design rules of Icelandic berm breakwaters

Majid Ehsani¹, Mohammad Navid Moghim², Mehdi Shafieefar³

1- Ph.D. Candidate, Department of Civil Engineering, Isfahan University of Technology, Iran

2- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Isfahan University of Technology, Iran

3- Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Tarbiat Modares University, Iran

moghim@cc.iut.ac.ir

Abstract

Berm breakwaters are rubble mound structures initially constructed with a large porous berm above or at still water level at the seaward side of structure. The main preference of this kind of structure is optimizing the yield of an armor stone quarry. In the past, there was not clear design rules on comprehensive determination of cross sections, so design of structure was based on the experience with earlier designs or based on the physical modeling. Hydraulic stability and wave overtopping are the two most important parameters in designing a berm breakwater. There are several parameters influencing the design of berm breakwaters, which evaluation each of them can help us to better understanding of hydraulic stability of the structure. There are however no general guidelines on the design of Icelandic type of breakwater taking recent research results and practical experience into account. The task of the present paper will be to study the different research results and compile all relevant information into practical guidelines for the design of Icelandic berm breakwaters.

Keywords: Icelandic berm breakwaters, geometrical design, hydraulic stability, effective parameters