مطالعه عملکرد بهبود دهنده‌های مختلف بر روی خصوصیات سنگ‌های ضعیف جهت استفاده در موج شکن‌ها

علیرضا باغبانان[۱]، مهران بخشی[۲*]، احسان محمدی[۳]، حمید هاشم الحسینی[۴]

[۱] دانشیار، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان؛ bagh110@cc.iut.ac.ir
[۲*] کارشناس ارشد فرآوری مواد معدنی، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان؛ mehran.bakhshi69@gmail.com
[۳] کارشناس ارشد مکانیک سنگ، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان؛ bagh110@gmail.com
[۴] دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان؛ hamidh@cc.iut.ac.ir

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:
تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۶/۰۳/۲۹
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۰۹/۲۶

کلمات کلیدی:
موج‌شکن
استحکام‌بخش
دوغاب بیولوژیک
آب آهک
رزین اپوکسی

چکیده

در سواحل جنوبی ایران احداث موج شکن‌های توده سنگی نسبت به سایر موج شکن‌ها متداول‌تر است. جهت احداث موج‌شکن‌ها، دسترسی به مصالح مناسب و با صرفه اقتصادی دارای اهمیت ویژه‌ای است. نمونه‌های گرفته شده از معدن سنگ لوماشل هُلُر درگهان به چهار گروه تقسیم شد. دسته‌ای از نمونه‌ها با آب آهک، دسته‌ای با رزین اپوکسی و دسته‌ای دیگر با دوغاب بیولوژیکی استحکام بخشی شدند. دسته‌ای دیگر هم بدون استعمال استحکام بخش جهت انجام آزمایش‌های کنترلی استفاده شد. با انجام آزمایش‌های مهندسی سنجش دوام ویژگی‌های فیزیکی، مقاومتی، دوام داری شیمیایی و مکانیکی نمونه‌ها تعیین گردید. نتایج نشان می‌دهد که آب آهک باعث کاهش ٪۸/۵ ، دوغاب بیولوژیکی سبب افزایش ٪۷ و رزین اپوکسی باعث افزایش ٪۱۷ در خصوصیات مکانیکی سنگ می‌شود. رزین اپوکسی به علت داشتن خواص فیزیکوشیمیایی غیر یکسان با سنگ و عمق نفوذ کم، یک استحکام بخش سطحی محسوب می‌شود و بایستی به صورت دوره‌ای مورد استفاده قرار گیرد.

A Study of the Performance of a Various Improvers on the Properties of Weak Stones for Use in Breakwaters

Alireza Baghbanan[1], Mehran Bakhshi[2*], Ehsan Mohammadi[3], Hamid Hashemalhoseini[4]

[1] Associate Prof, Department of Mining Engineering Isfahan University of Technology, bagh110@cc.iut.ac.ir
[2]M.Sc., Department of Mining Engineering Isfahan University of Technology, Mehran.bakhshi69@gmail.com
[3]M.Sc., Department of Mining Engineering Isfahan University of Technology, bagh110@gmail.com
[4]Associate Prof, Department of Civil Engineering Isfahan University of Technology, hamidh@cc.iut.ac.ir

ARTICLE INFO

Article History:
Received: 19 Jun. 2017
Accepted: 17 Dec. 2017

Keywords:
breakwater
improvement
biogrout
limewater
resin epoxy

ABSTRACT

Rock breakwaters are used mostly in south costs of Iran compared to the other types of breakwaters, while enough source of good rock deposits is quite rare. A numbers of Lomashel rock samples of Holor mine of Dargahan in Qeshm Island were taken and subjected to three different improvement materials of limewater, resin epoxy and biogrout and physical and mechanical properties of both natural and treated rock samples were measured in laboratory. The results show that limewater decreases the rock quality up to 8.5% while biogrout, and resin epoxy increase rock quality up to 7% and 17% respectively compared to the natural rock samples. Resin epoxy known as a surface improvement because of its different physicochemical attributes with rock and its small penetration depth. Therefore this treatment should be used periodically, while biogrout treatment enjoys of more compatible mineral composition with Lomashel with a deeper dispersion rate into the rock.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1396.13.26.8.6]

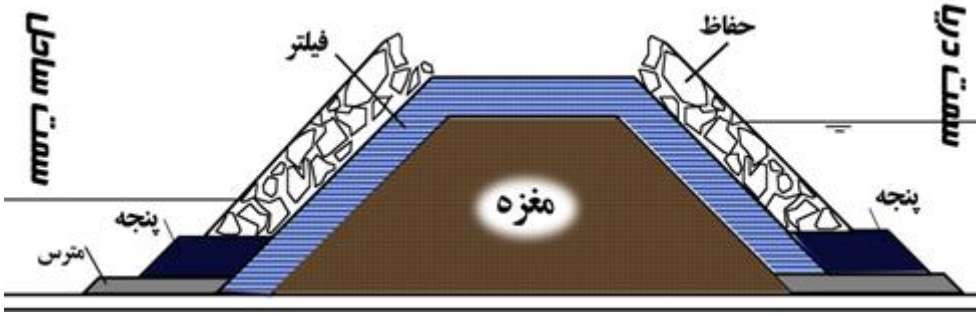
۱ - مقدمه

در سال‌های اخیر، با توجه به توسعه امکانات و تسهیلات ساحلی در سطح جهان، احداث سازه‌های دریایی و حفاظتی سواحل، افزایش چشمگیری داشته است. سازه‌های دریایی و ساحلی برای کاربردهای مختلفی نظیر ایجاد امکان پهلوگیری شناورها، حفاظت سواحل، استحصال اراضی از دریا، ایجاد سدهای حفاظتی در مقابل امواج احداث می‌گردند. ازجمله سازه‌های حفاظت کننده سواحل و بندرها می‌توان به موج‌شکن‌ها (Breakwater) اشاره نمود. سنگ به عنوان یکی از کاربردی‌ترین و اصلی‌ترین مصالح مصرفی در این سازه‌ها محسوب می‌گردد. بنابراین احداث موج شکن توده سنگی نسبت به سایر انواع موج شکن‌ها متداول‌تر است [۱]. این سازه معمولاً از دو بازوی سنگی با مقطع ذوزنقه‌ای شکل و با لایه‌بندی مشخص تشکیل می‌شود. حوضچه محصور و آرام بین دو بازوی موج‌شکن از طریق دهانه ورودی ایجاد شده بین بازوها به محیط امواج خارج از حوضچه مرتبط می‌شود و عبور و مرور شناورها از طریق این دهانه صورت می‌گیرد [۲]. به طورکلی بدنه یک موج‌شکن از سه بخش اصلی مغزه، فیلتر و لایه حفاظ تشکیل شده است. چنانچه بستر دریا در محل اجرای موج‌شکن ضعیف باشد در زیر بدنه سازه یک لایه با عنوان مترس ریخته می‌شود که بار ناشی از سازه را بر روی بستر دریا توزیع کرده و از نشست‌های غیرمجاز سازه جلوگیری می‌کند. قسمت‌های مختلف یک موج‌شکن توده سنگی در شکل ۱ نشان داده شده است [۳].

در ساخت موج‌شکن‌های توده سنگی بایستی از مصالح مناسبی استفاده شود که قابل دسترس بوده و احداث سازه توجیه اقتصادی داشته و همچنین نگهداری آن کم هزینه باشد و تأمین ایمنی و پایداری لازم را در عمر مفید خود ارائه دهد [۱, ۴]. بنابراین انتخاب نوع سنگ با توجه به وضعیت کاربرد آن از اهمیت خاصی برخوردار است [۵-۸]. بر اساس مطالعات صورت گرفته در طول ۱۰۰۰ کیلومتر از سواحل جنوبی ایران، اغلب مصالح مصرفی موج شکن‌های توده سنگی ساخته شده از جنس سنگ‌های زیستی تخریبی (لوماشل) بوده است. این تحقیقات نشان می‌دهد بر اثر کیفیت ضعیف مصالح به کار رفته در آن‌ها، موج شکن‌ها دچار تخریب‌هایی که به صورت نشست سازه و فرو ریزی لایه حفاظ، هوازدگی، فرسایش و گرد گوشه شدن و به وجود آمدن حفرات انحلالی به دلیل استفاده از سنگ‌های آهکی مارنی با سیمان شدگی کم و وزن مخصوص پایین بوده است [۱, ۹]. تخریب و زوال موج شکن‌های توده سنگی بر پایه سنگ‌های لوماشل، یکی از مشکلات مهمی است که امروزه سواحل جنوبی ایران با آن روبرو است. با توجه به گزارش خرابی‌هایی که در سال‌های اخیر برای موج شکن‌های حاشیه جنوبی ایران که با سنگ لوماشل ایجاد شده، استحکام بخشی این سنگ‌ها بسیار ضرورت دارد. لذا با توجه به پارامترهای اقتصادی، بهسازی مقاومتی این سنگ‌ها می‌تواند نسبت به حمل سنگ از نواحی دور، مقرون به صرفه‌تر باشد. برای استحکام بخشی از روش‌های مختلفی مانند استحکام بخشی با آب آهک [۱۰]، استحکام بخشی با رزین اپوکسی‌ها [۱۱]، استحکام بخشی با میکروارگانیسم‌های قلیایی [۱۲-۱۴]، استفاده می‌شود.

در ۳۰ سال گذشته، به طور معمول از تثبیت کننده‌های غیرارگانیک برای استحکام بخشی سنگ، استفاده شده است. قدیمی‌ترین ماده استحکام بخش غیر آلی که جهت درمان و استحکام بخشی سنگ‌های کربناته آهکی مورد استفاده قرار گرفته، آب آهک است. پیشرفت‌های به دست آمده در استحکام بخشی مجسمه‌های قرون وسطایی کلیسای ولز انگلیس، با آب آهک یا شیر آهک [۱۵]، توجه جدیدی را نسبت به این ماده به عنوان یک استحکام بخش سنگ در دهه اول ۱۹۷۰ میلادی به خود جلب کرد [۱۰, ۱۶, ۱۷].

رزین‌های اپوکسی، پلیمرهای متراکمی هستند که انواع گوناگونی از مواد را تشکیل می‌دهند. تنوع زیاد این مواد، به خاطر ساختار فیزیکی و شیمیایی متمایز آن‌ها است. آمیزش‌های گوناگون مواد سخت کننده، پرکننده و مواد افزایشی، موجب ایجاد انواع ورنی‌ها، رزین‌های قالب‌گیری، ملات و بتن مصنوعی و مواد مورد استفاده در اشباع و حفاظت سنگ می‌شود [۱۱, ۱۸].



شکل ۱- مقطعی از قسمت‌های مختلف یک موج‌شکن توده سنگی [۳]

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1396.13.26.8.6]

استفاده از روش‌های بیولوژیکی برای بهسازی، گزینه‌ای جدید و دوستدار محیط زیست برای مهندسان می‌باشد. استفاده از میکروارگانیسم‌ها برای تولید سیمان کلسیتی، چندین دهه است که با کاربردهای صنعتی برای فرایندهایی نظیر تولید سیمان در اطراف چاه‌های نفت برای افزایش میزان بازیابی از مخازن نفتی، غیر متحرک کردن کلسیم و سایر آلودگی‌ها در آب‌های زیر زمینی و سطحی، بهسازی و تعمیر مصالح سنگی آهکی به کار برده شده است [۱۲, ۱۹, ۲۰]. میکروارگانیسم قلیایی دوستدار خاک، نقش مهمی را در فرایند سیمانی کردن، از طریق تولید آنزیم اوره آز ایفا می‌کند [۲۱, ۲۲].

معیارها و رده بندی‌های مختلفی برای ارزیابی کیفیت و دوام سنگ‌های مورد استفاده در لایه حفاظتی موج شکن‌ها ارائه شده است. این معیارها را به دو دسته معیارهای داخلی و خارج کشور دسته‌بندی شده‌اند. از جمله معیارهای داخلی که برای ارزیابی مصالح سنگی استفاده می‌شود؛ معیار جلالی [۵]، معیار نیکودل [۶]، معیار ناصحی [۲۳]، معیار حسنلی [۹] و معیار تلخابلو [۱] می‌باشد. مطالعات نیکودل و جلالی [۵, ۶]، بیشتر بر روی سنگ‌های آذرین به کار رفته در موج شکن‌های استان هرمزگان متمرکز بوده است. مطالعات صورت گرفته توسط ناصحی [۲۳]، صرفاً روی سنگ‌های رسوبی استان سیستان و بلوچستان بوده و حسنلی [۹]، نیز تحقیقات خود را به سنگ‌های آهکی موج شکن‌های استان بوشهر اختصاص داده است. تلخابلو ضمن ارزیابی ویژگی‌های مهندسی مصالح سنگی بکار رفته در موج شکن‌های منطقه وسیعی از سواحل خلیج فارس و دریای عمان و بر اساس تحلیل حاصل از انجام آزمایش‌های مهندسی سنجش دوام و مقایسه آن‌ها با نتایج ارزیابی‌های صحرایی از عملکرد واقعی سنگ‌ها، معیارهای پیشنهادی انتخاب سنگ برای سه گروه سنگ‌های آهکی، آذرین و لوماشل ارائه نمود. مقایسه نتایج حاصل از بررسی‌های تلخابلو با معیارهای دیگر نشان می‌دهد که در این معیار درصد بیشتری از سنگ‌ها در بازه‌ی مورد قبول برای کاربرد در لایه حفاظ موج شکن قرار می‌گیرند. بنابراین در این تحقیق این معیار به عنوان مناسب‌ترین مبنا برای ارزیابی افزایش خصوصیات سنگ‌های بهسازی شده نسبت به سنگ بهسازی نشده، انتخاب شد که جزئیات این معیار در جدول ۱ قابل مشاهده است. با توجه به این نکته که استاندارد ذکر شده بر اساس امتیازدهی به خصوصیات مکانیکی سنگ استوار است، بنابراین بهترین معیار برای مقایسه بین روش‌های استحکام بخشی خواهد بود. بطوریکه هر چه امتیاز مربوطه بیشتر باشد، استحکام بخشی در بهسازی سنگ بهتر عمل نموده و سنگ مقاوم‌تر و بهتر است. بر اساس معیار حاضر و بررسی‌های صورت گرفته در مطالعات قبلی، حدود ۶۵ درصد از سنگ‌های لوماشل در رده ضعیف (D) و متوسط (C) قرار دارند [۳]. با توجه به اینکه سنگ‌هایی که رده کیفیت آن‌ها امتیاز کمتر از ۴۰-۵۰ داشته باشند، برای استفاده در لایه حفاظ غیر قابل قبول محسوب می‌شوند [۳]، لذا مواد استحکام بخش باید باعث بهبود خصوصیات سنگ شده و بتوانند مجموع امتیاز بیشتر از ۶۰ را کسب نموده و به رده‌های خوب (B) و عالی (A) ترفیع یابد.

جدول ۱ - سیستم امتیازدهی تلخابلو در سنگ‌های لوماشل (تلخابلو, م. ۱۳۸۶)

خصوصیات	پارامتر	رده (شاخص کیفیت)				
		E	D	C	B	A
فیزیکی	جذب آب (٪)	>۲۴	۱۸-۲۴	۱۲-۱۸	۶-۱۲	<۶
	دانسیته (KN/m^3)	<۱۵	۱۵-۱۷	۱۷-۱۹	۱۹-۲۱	>۲۱
	امتیاز	۵	۱۰	۱۵	۲۰	۲۵
مقاومتی	شاخص بار نقطه‌ای (MP)	<۱	۱-۱/۵	۱/۵-۲/۵	۲/۵-۴	>۴
	مقاومت تک محوری (MP)	<۷	۷-۱۰	۱۰-۲۵	۲۵-۴۰	>۴۰
	امتیاز	۵	۱۰	۱۵	۲۰	۲۵
دوام داری مکانیکی	ارزش ضربه‌ای (٪)	>۶۰	۴۵-۶۰	۳۰-۴۵	۱۵-۳۰	<۱۵
	شاخص دوام (۱۵ سیکل) (٪)	<۶۵	۶۵-۷۵	۷۵-۸۵	۸۵-۹۰	>۹۰
	سایش لس‌آنجلس (٪)	>۷۵	۶۰-۷۵	۴۵-۶۰	۳۰-۴۵	<۳۰
	امتیاز	۵	۱۰	۱۵	۲۰	۲۵
دوام داری شیمیایی	سلامت سنگ (۱۰ سیکل) (٪)	>۲۲	۱۸-۲۲	۱۴-۱۸	۱۰-۱۴	<۱۰
	امتیاز	۵	۱۰	۱۵	۲۰	۲۵
	مجموع امتیازها	≤۲۰	۲۰-۴۰	۴۰-۶۰	۶۰-۸۰	۸۰-۱۰۰

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1396.13.26.8.6]

هدف اصلی در این پژوهش بررسی استحکام بخشی سنگ‌های لوماشل با سه روش بهسازی با آب آهک، بهسازی با رزین اپوکسی و بهسازی با دوغاب بیولوژیکی با استفاده از میکروارگانیسم‌های قلیایی می‌باشد. در این رابطه، پس از آنکه نمونه‌های سنگی بهسازی شد، نمونه‌های تهیه شده جهت بررسی تأثیرات این استحکام بخش‌ها، مورد آزمایش‌های فیزیکی، مقاومتی و دوام داری قرار گرفته و نتایج حاصله با یکدیگر مقایسه می‌شوند.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- مواد

لوماشل نوعی سنگ رسوبی تخریبی محسوب می‌شود، که با سهولت استخراج شده و فراوانی زیادی در رخنمون‌های سنگی واقع در نوار ساحلی جنوب ایران در سازندهای میشان و آغاجاری دارد. همچنین در برخی سازندهای محلی مانند سازند قشم و خارک در سواحل خلیج فارس و در تشکیلات میوسن تا پلیوسن نواحی جنوب شرقی ایران گسترش داشته و در ساخت بسیاری از موج شکن‌های منطقه مورد استفاده قرارگرفته است. واژه لوماشل یک اصطلاح فرانسوی است که از ترکیب دو کلمه لوم (Loam) به معنی ماسه و شِل (Shell) به معنی پوسته ساخته شده و در اینجا به سنگ‌هایی نسبت داده می‌شود که ذرات آن از پوسته جانداران دریایی (خردشده یا خرد نشده) تشکیل شده و با چشم غیر مسلح قابل مشاهده باشد. محدوده اندازه ذرات این سنگ از ریزترین ذرات ماسه (۰/۰۶ میلی‌متر) درشت‌تر می‌باشد. این نوع سنگ‌های آهکی بر خلاف سایر سنگ‌های آهکی که منشأ شیمیایی دارند، دارای منشا تخریبی است. ذرات تخریبی تشکیل دهنده این سنگ از بقایای خرد شده پوسته جانداران دریایی تشکیل شده که اغلب دارای ترکیب کلسیت و یا آراگونیت هستند که با سیمان آهکی از نوع دریایی به هم متصل گردیده‌اند. سنگ‌های لوماشل اغلب وزن مخصوص پایین و جذب آب نسبتاً بالایی دارند و برای کاربرد در لایه حفاظ موج‌شکن‌ها عموماً فاقد صلاحیت شمرده می‌شوند. آنالیز XRF نمونه‌های سنگی در جدول ۲ نشان داده شده است. در این تحقیق تعداد بیست نمونه سنگ لوماشل از معدن هلر درگهان واقع در شمال شرق جزیره قشم تهیه شد. همانطور که در جدول ۲ مشاهده می‌شود میزان CaO در نمونه زیاد بوده و این مسئله نشان دهنده آهکی بودن نمونه سنگ لوماشل است. همچنین بخش عمده‌ای از ترکیب سنگ را ترکیبات آلی و عناصر فرار (L.O.I) تشکیل داده است.

۲-۲- روش‌ها

۲-۲-۱- استحکام بخشی با آب آهک

ماده اصلی تولید آهک، سنگ آهک (کربنات کلسیم) با فرمول شیمیایی $CaCO_3$ می‌باشد که با حرارت دادن در انواع کوره‌های پخت، گاز CO_2 از آن خارج می‌شود و در نتیجه مطابق واکنش زیر اکسید کلسیم CaO (آهک زنده) حاصل می‌گردد (واکنش ۱). حضور آب سبب می‌شود اکسید کلسیم شکفته شده و تبدیل به کلسیم هیدروکسید (آهک هیدراته) شود و انرژی آزاد کند (واکنش ۲). آب آهک یک نام معمول برای محلول اشباع کلسیم هیدروکسید است که فرمول شیمیایی آن $Ca(OH)_2$ می‌باشد. آب آهک از ترکیب کلسیم هیدروکسید با آب مقطر به دست می‌آید. این مخلوط باید به شدت هم زده و تکان داده شود تا از اشباع بودن آن اطمینان حاصل شود. پس از ته نشست، کلسیم هیدروکسید اضافی که در آب حل نشده جدا می‌شود و مایع شفاف رویی به عنوان آب آهک برای استحکام بخشی جمع آوری می‌شود. محلول آب آهک در تماس با دی‌اکسیدکربن، شیری رنگ می‌شود. زیرا کربنات کلسیم تولید شده طبق واکنش ۳، در آب نامحلول است.

$$CaCO_3 + \text{حرارت } E \rightarrow CaO + CO_2 \quad (۱)$$

$$CaO + H_2O \rightarrow Ca(OH)_2 + 275\ \frac{cal}{g} \quad (۲)$$

$$Ca(OH)_2 + CO_2 \rightarrow CaCO_3 + H_2O \quad (۳)$$

در روش بهسازی با آب آهک، نمونه‌ها ۴۰ مرتبه در معرض آب آهک قرار می‌گیرد، فاصله بین هر بار اسپری، به اندازه خشک شدن سطح نمونه بوده است. نمونه‌ها تحت تأثیر گاز دی اکسید کربن به مدت ۲۰ روز در هوای آزاد قرار می‌گیرد تا دی‌اکسیدکربن هوا با کلسیم هیدروکسید موجود در آن‌ها واکنش دهد و سبب ایجاد کلسیم کربنات در سنگ شود و باعث می‌شود حفرات و خلل و فرج سنگ پر شده و باعث استحکام سنگ شود [۱۵, ۲۴].

در این تحقیق، مطابق شکل ۲ برای استحکام بخشی تعدادی از نمونه‌ها با آب آهک، طبق روش ذکر شده، آب آهک بر سطح نمونه‌ها پاشیده شده است [۲۴].

جدول ۲- نتیجه آنالیز XRF نمونه سنگ لوماشل معدن هُلُر درگهان قشم

لوماشل هُلُر	K_2O	Na_2O	MnO	P_2O_5	TiO_2	MgO	CaO	F_2O_3	Al_2O_3	SiO_2	$L.O.I$
ترکیبات (٪)	۰/۰۴۹	۰/۰۵۷	۰/۰۷	۰/۰۱۴	۰/۰۷	۰/۳۵۹	۵۴/۴۳	۰/۰۹	۰/۱۵۲	۱/۲۴	۴۳/۳۶

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-03]

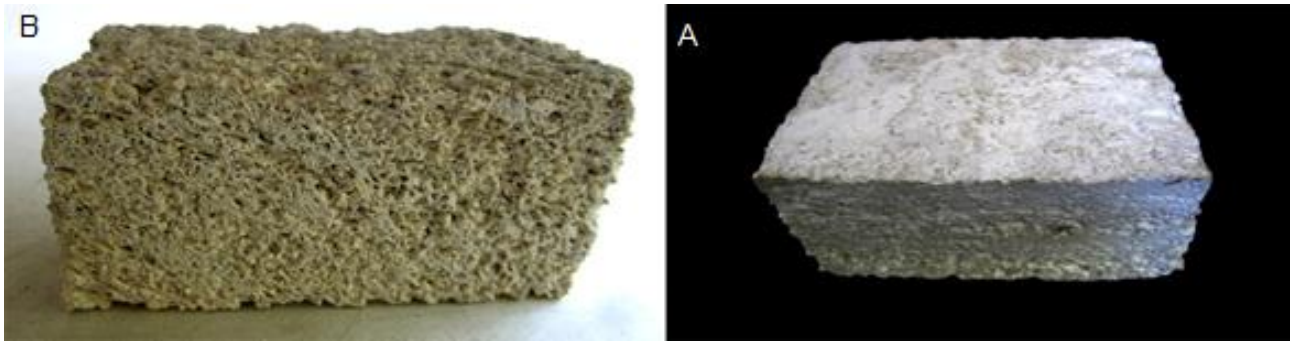
[DOR: 20.1001.1.17357608.1396.13.26.8.6]

آنچه در ابتدا مهم است، آگاهی از میزان نفوذ ماده استحکام‌بخش در سنگ می‌باشد. برای دستیابی به این هدف، از آزمایش فنل فتالئین استفاده شد. چنان چه می‌دانیم، فنل فتالئین در ترکیب با مواد قلیا، صورتی رنگ می‌شود. برای شروع آزمایش، روی سطح یک نمونه سنگ استحکام بخشی شده با آب آهک، با آب مقطر به وسیله اسپری خیس شده است. سپس روی مقطع عرضی سنگ، از پایین تا بالا فنل فتالئین ریخته شد. از اولین نقطه‌ای که رنگ قطره فنل فتالئین صورتی شد، تا لبه ابتدای مقطع عرضی که متصل به سطح رویی است، میزان نفوذ ماده استحکام‌بخش مشخص می‌شود. شکل ۳ میزان عمق نفوذ ماده استحکام بخش در دو نمونه سنگ‌های مورد آزمایش را نشان می‌دهد. همان طور که در شکل دیده می‌شود، به طور میانگین میزان نفوذ آب آهک در سنگ بیشتر از ۴ میلی‌متر و کمتر از ۱۲ میلی‌متر است.

۲-۲-۲- استحکام بخشی با استفاده از رزین اپوکسی

رزین‌های اپوکسی، پلیمرهای متراکمی هستند که انواع گوناگونی از مواد را تشکیل می‌دهند. تنوع زیاد این مواد، به خاطر ساختار فیزیکی و شیمیایی متمایز آن‌ها است. رزین‌های اپوکسی به ندرت، به تنهایی مورد استفاده قرار می‌گیرند بلکه معمولاً با افزایش یک ماده عمل آور چند عملکردی یا سخت کننده، که ساختار شیمیایی و خواص فیزیکی رزین را تغییر داده و آن را به ماده سخت تبدیل می‌کند، به کار می‌روند. رزین‌های اپوکسی در برابر اسیدها، بازها و حلال‌های آلی بسیار مقاوم هستند. این ماده علاوه بر مقاومت‌های خمشی و سایشی بسیار خوب، دارای چسبندگی بسیار زیاد به سطح زیر است و اجرای آن نیز بسیار آسان می‌باشد. این سیستم از سه جز تشکیل شده؛ پرایمر که محلولی بر پایه آکریلیک، جهت آماده سازی سطح، چسب آب بندی که تشکیل دهنده لایه‌های متعدد آب بند بر پایه کوپلیمرهای استایرن آکریلات و پودر پایه سیمانی که محتوی افزونی‌های شیمیایی جهت تقویت لایه‌های آب بند می‌باشد.

مهم‌ترین عامل برای نتیجه بخش بودن سیستم آب بندی، سالم بودن سطح زیر کار است. بدین ترتیب ابتدا بهتر است تمام سطح زیر کار تمیز گشته و ذرات جدا شده ماسه و پودر پاک شود. آنگاه پرایمر به وسیله قلم‌مو بر روی تمام سطح زده می‌شود. این لایه پس از ۲۰ دقیقه خشک و آماده اجرای لایه‌های اصلی می‌شود. برای تهیه ملات اصلی یک پیمانه چسب آب بندی را با ۱/۵ پیمانه آب رقیق نموده و ۴ پیمانه پودر پایه سیمانی را به آن اضافه می‌کنیم. این مایع پس از ۱۰ دقیقه مجددا به طور کامل مورد همزنی قرار گرفته و به وسیله قلم مو دو مرتبه، به فاصله زمانی ۲ ساعت بر سطح نمونه قرار می‌گیرد. ضخامت دو لایه بر اساس دستور کار ارائه شده حدود یک میلی متر کافیست.



شکل ۲- نمونه سنگ بهسازی شده با آب آهک (A) و نمونه سنگ شاهد (B)



شکل ۳- سطح مقطع فنل فتالئین زده دو نمونه از سنگ لوماشل معدن هُلُر درگهان استحکام بخشی شده با آب آهک

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-03]

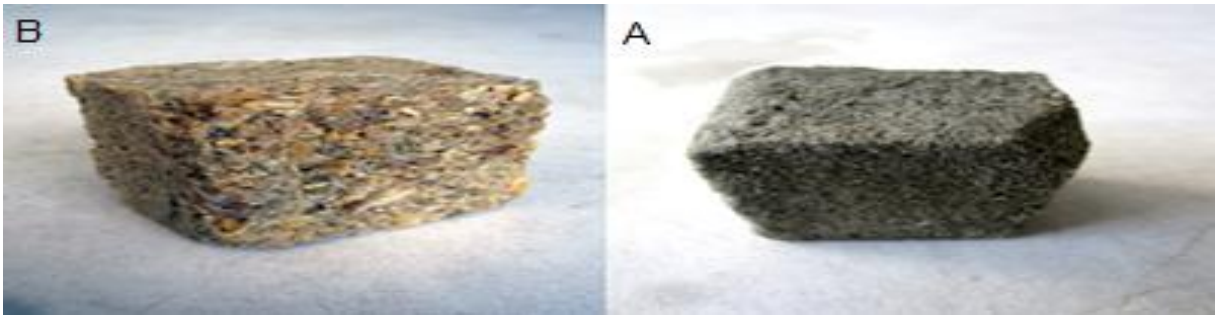
[DOR: 20.1001.1.17357608.1396.13.26.8.6]

در شکل ۴ نمونه بهسازی شده با رزین اپوکسی و نمونه اولیه قابل مشاهده است. همان طور که در شکل ۴ دیده می‌شود، این رزین صرفاً یک استحکام بخش سطحی است که با توجه به اجزای تشکیل دهنده آن به صورت یک لایه محکم به سطح رویی سنگ چسبیده و خلل و فرج‌های آن را پوشش داده است. این ماده نفوذ خیلی کمی داشته و به لحاظ اقتصادی نیز نسبت به آب آهک بسیار گران‌تر می‌باشد.

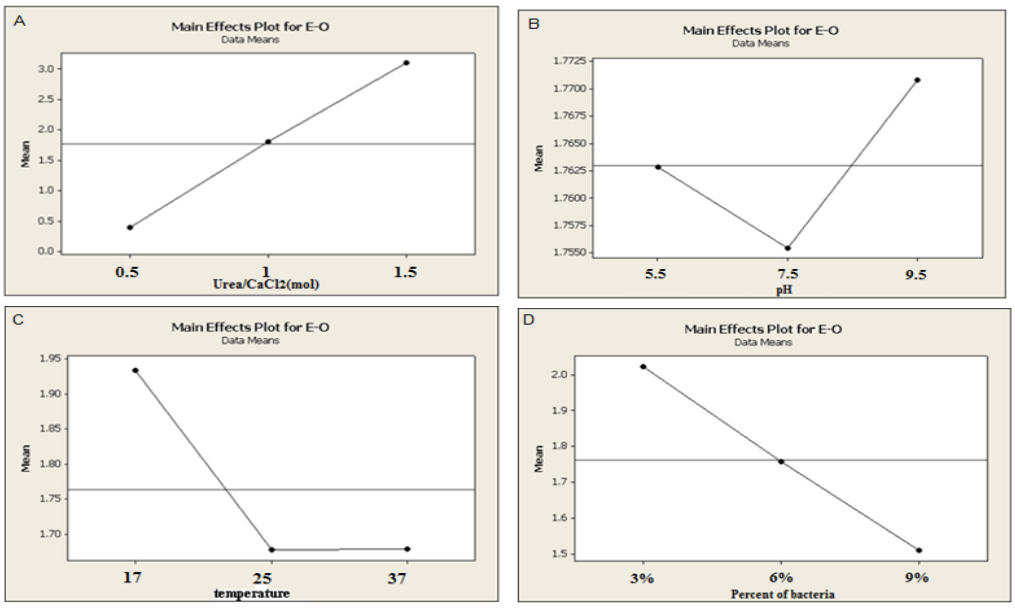
۲-۲-۳- استحکام بخشی با میکرو ارگانیسم‌های قلیایی

میکروارگانیسم مورد استفاده با نام علمی *Sporosarcina Pasteurii* می‌باشد. سویه مورد نظر از مرکز کلکسیون قارچ‌ها و باکتری‌های صنعتی ایران به شماره شناسایی PTCC 1645 (DSM33) به صورت کشت زنده تهیه گردید. این میکروارگانیسم در محیط مناسب کشت شد. شرایط بهینه عملکرد این میکروارگانیسم قبلا در یکسری آزمایش‌های نظام‌مند بدست آمده است [۱۲, ۲۵]. در آن آزمایش‌ها برای بررسی تأثیر عواملی از قبیل غلظت اوره و کلرید کلسیم، دما، درصد حجمی باکتری‌های افزوده شده و pH محیط در نتایج آزمایش‌ها، با ثابت نگه داشتن عواملی از قبیل غلظت باکتری‌ها، از دو روش عاملی کامل و روش تاگوچی [۱۲, ۲۵] برای طراحی آزمایش‌ها و آنالیز حساسیت آن‌ها به عوامل فوق‌الذکر، استفاده گردید که تاثیر این عوامل به طور مختصر در شکل ۵ قابل مشاهده است. در این شکل محور عمودی نمودارها میزان اختلاف بین مقادیر اندازه گیری شده در آزمایش و مقدار محاسبه شده بر اساس روابط استوکیومتری را نشان می‌دهد که هر چه این مقدار به صفر نزدیک‌تر باشد شرایط ایده‌آل‌تر است.

بنابراین با توجه به شکل ۵ می‌توان چنین استنباط کرد که شرایط بهینه برای فرایند استحکام بخشی بیولوژیک، غلظت ۰/۵ مولار اوره و کلرید کلسیم، pH بین ۷ تا ۹، دمای ۲۵ درجه سلسیوس و میزان ۹٪ حجمی باکتری‌های افزوده شده به محلول با چگالی نوری ۲/۵ (OD600=2.5) می‌باشد [۱۲, ۲۵]. پس از آماده سازی شرایط بهینه برای فعالیت اوره‌آزی باکتری‌ها، سنگ‌ها را درون سطل‌های محتوی باکتری قرار داده تا اشباع شوند. بعد از گذشت ۲۴ ساعت، محلول اوره و کلرید کلسیم به محیط اضافه و به مدت ۱۵ روز نگهداری شدند. سپس نمونه‌ها خشک شده و مورد آزمایش قرار می‌گیرند.



شکل ۴- نمونه سنگ بهسازی شده با رزین اپوکسی (A) و نمونه سنگ شاهد (B)



شکل ۵- بررسی تاثیر غلظت اوره و کلریدکلسیم (A)، تاثیر pH (B)، تاثیر دما (C) و تاثیر باکتری (D) در آزمایش‌ها

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1396.13.26.8.6]

در این روش تحت شرایط مطلوب زیست محیطی باکتری *Sporosarcina Pasteurii*، اوره را به عنوان منبع انرژی مصرف کرده و باعث تولید آمونیا و دی اکسید کربن می‌گردد (واکنش ۴). هم‌زمان با هیدرولیز شدن آنزیمی اوره، دو واکنش دیگر به طور طبیعی در حضور آب انجام می‌شود و باعث می‌شود که آمونیا و دی اکسید کربنی که به وسیله اوره آزاد شده است، به یون‌های آمونیوم(NH_4^+) و اسید کربنیک (HCO_3^-) تبدیل گردد (واکنش ۵ و ۶). تولید یون‌های آمونیوم باعث افزایش pH محیط می‌گردد که این افزایش pH ناشی از افزایش میزان یون‌های هیدروکسید(OH^-) بوده و باعث می‌شود که بهترین و مناسب‌ترین شرایط محیطی برای رشد باکتری‌ها و مصرف اوره موجود و در نهایت رسوب کربنات کلسیم شوند (واکنش ۷). به دنبال این فرایند، باندهایی از سیمان کلسیتی در فضاهای خالی موجود در سنگ تشکیل و باعث پر شدن آن‌ها و در نتیجه افزایش مقاومت سنگ می‌شوند [۲۱, ۲۶]. در شکل ۷ نحوه عملکرد میکروارگانیسم و طریقه ایجاد سیمان کلسیتی قابل مشاهده است.

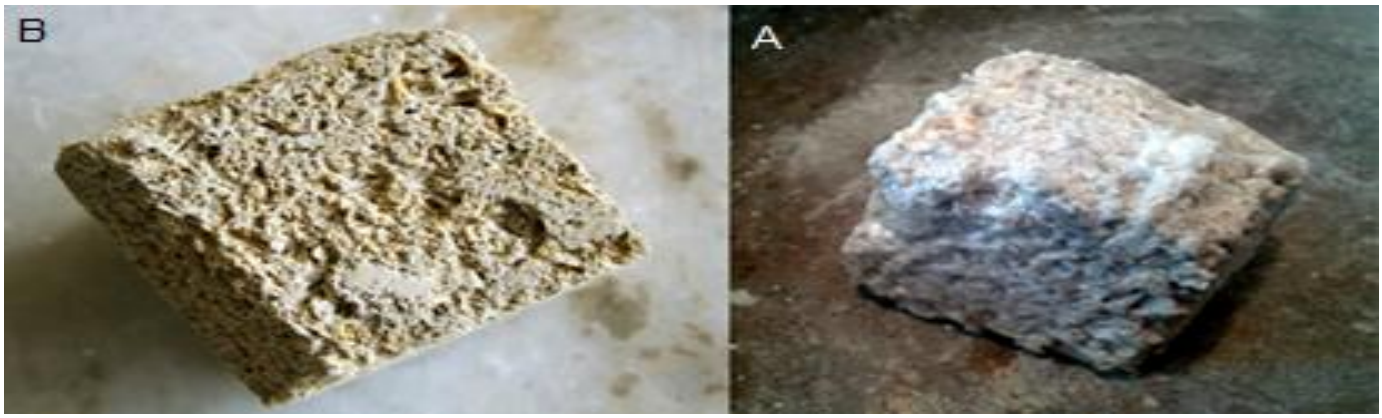
$$CO(NH)_2 + H_2O \rightarrow 2NH_3 + CO_2 \quad (۴)$$

$$2NH_3 + H_2O \rightarrow 2NH_4^+ + 2OH^- \quad (۵)$$

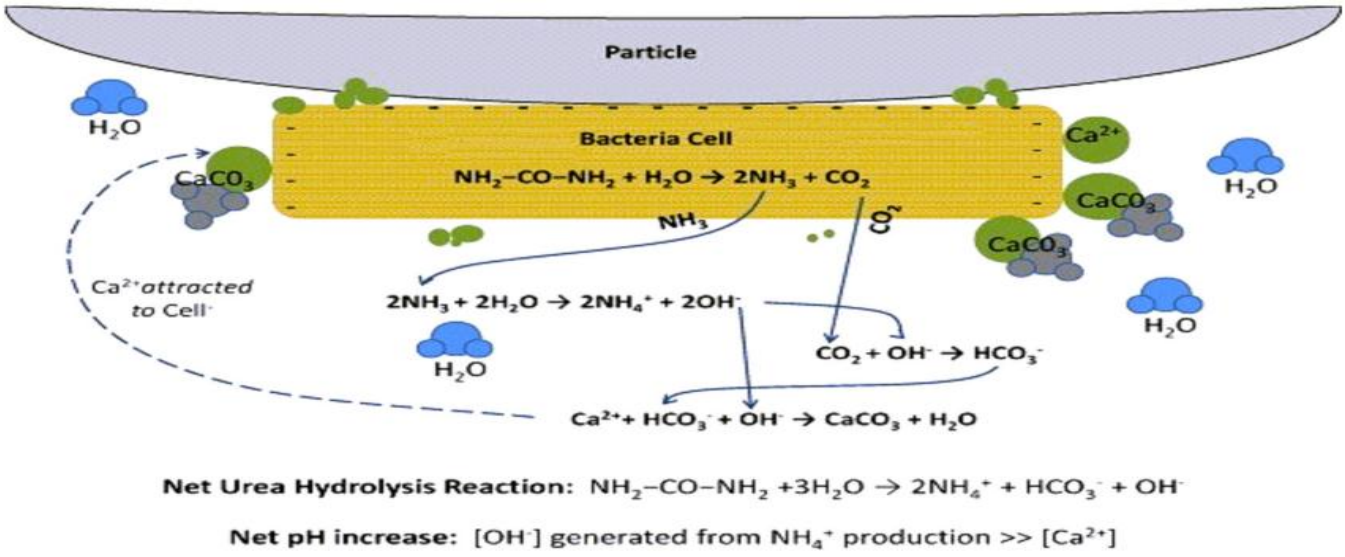
$$CO_2 + OH^- \rightarrow HCO_3^- \quad (۶)$$

$$Ca^{2+} + HCO_3^- + OH^- \rightarrow H_2O + CaCO_3 \quad (۷)$$

پس از طی مراحل سنتز و عمل آوری، شکل ۶، مقایسه‌ای بین نمونه سنگ شاهد و نمونه بهسازی شده با محلول بیولوژیکی را نشان می‌دهد. بر اساس تحقیقات صورت گرفته، مهم‌ترین مواد غذایی لازم برای رشد این گونه باکتری‌ها و همچنین مهم‌ترین مؤلفه‌های شیمیایی برای سیمانی کردن و تشکیل کربنات کلسیم شامل مخمر، کلرید آمونیوم، کلرید کلسیم و اوره می‌باشد [۱۲, ۲۵].



شکل ۶- نمونه سنگ بهسازی شده با محلول بیولوژیکی (A) و نمونه سنگ شاهد (B)



شکل ۷- تصویر شماتیکی از واکنش‌های بیوشیمیایی در ماتریکس خاک [۲۷]

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1396.13.26.8.6]

۲-۳- بررسی خواص مهندسی سنگ

برای ارزیابی خواص مهندسی مصالح سنگی، آزمایش‌هایی به کار می‌رود که به کمک آن‌ها خصوصیات سنگ برآورد می‌گردد. این آزمایش‌ها که طبق استانداردهای ISRM و یا ASTM انجام شده است، جنبه‌های مختلف خصوصیات سنگ از جمله خصوصیات فیزیکی، خصوصیات مقاومتی و خصوصیات دوام را تشریح می‌کند.

در تشریح خصوصیات فیزیکی آزمایش‌های تعیین وزن مخصوص (Density - ISRM) و میزان جذب آب (– Water Content ISRM, ASTM D2216)، به عنوان دو آزمایش شاخص در تعیین کیفیت مصالح سنگی شناخته شده است. در تشریح خصوصیات مقاومتی، آزمایش بار نقطه‌ای انجام شده است. با استفاده از نتایج آزمایش می‌توان مقاومت فشاری و کششی سنگ بکر را نیز بدست آورد [۱, ۲۸, ۲۹]. در تشریح خصوصیات دوام داری سعی می‌شود آزمایش‌ها شرایط حاکم بر محیط استفاده از سنگ را تا حد ممکن شبیه‌سازی کنند تا نتایج آزمایش به واقعیت نزدیک‌تر و منطبق بر شرایط محل باشد [۳]. این آزمایش‌ها شامل ارزش ضربه‌ای [۳]، دوام [۲۹]، سایش لس آنجلس [۲۹] و سلامت سنگ [۲۳] می‌باشد. خلاصه‌ای از کلیه نتایج آزمایش‌ها در جدول ۳ قابل مشاهده است.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- بررسی خواص مهندسی سنگ

در بررسی خواص مهندسی سنگ بعضی از پارامترها نسبت مستقیم با دوام داری سنگ دارند مانند؛ دانسیته، شاخص بار نقطه‌ای، مقاومت تک محوری و شاخص دوام به طوری که با افزایش این پارامترها دوام داری سنگ افزایش و با کاهش آن دوام داری کاهش می‌یابد. این در حالی است که بعضی پارامترها نسبت معکوس با دوام داری سنگ دارند که عبارتند از جذب آب، ارزش ضربه‌ای، سایش لس آنجلس و سلامت سنگ که با افزایش آن‌ها دوام داری کاهش و با کاهش آن‌ها دوام داری افزایش می‌یابد.

در شکل ۸ خواص مهندسی سنگ به صورت نمودار ستونی قابل مشاهده است. در این نمودار پارامترهای مهندسی سنگ به همراه مواد استحکام بخش دیده می‌شود. همچنین این نمودار سنگ استحکام بخش شده را با نمونه شاهد مقایسه می‌کند به طوری که افزایش یا کاهش پارامترها را نسبت به نمونه شاهد نشان می‌دهد.

آب آهک سبب شده تا شاخص پوکی و تخلخل سنگ افزایش یافته و سبب افزایش جذب آب و کاهش ویژگی‌های مقاومتی و دوام داری شود. دلیل آن را اینگونه می توان توجیه کرد که، دی اکسید کربن هوا برای ایجاد میزان کافی کربنات کلسیم جهت استحکام بخشی سنگ ضروری است. کلسیم هیدروکسید محلول یا مرطوب با دی‌اکسید کربن هوا واکنش داده و تشکیل کربنات کلسیم نامحلول می‌دهد که از لحاظ شیمیایی با سنگ آهک یکسان است. ته نشست کربنات کلسیم روی سطح، به محض جذب دی‌اکسید کربن از هوا آغاز می‌شود. ذرات کلسیم هیدروکسید درون منافذ و قسمت‌های متخلخل سنگ نفوذ می‌کنند و پس از واکنش با دی اکسید کربن هوا، تبدیل به کلسیم کربنات شده ولی چون این آزمایش در آب و هوایی معمولی انجام شده و شرایط طبیعی جوی حاکم بوده است، بنابراین ممکن است دی اکسید کربن هوا به مقدار لازم در اختیار محلول نبوده و رسوب کربنات کلسیم تولید نشده است. در استحکام بخشی با رزین اپوکسی شاخص بار نقطه‌ای و مقاومت تک محوری کاهش می‌یابد. رزین سبب ایجاد یک لایه روی سطح سنگ می‌شود که به شدت به سنگ می‌چسبد و خلل و فرج سنگ را پُر کرده، باعث کاهش جذب آب و بهبود ویژگی‌های دوام داری مکانیکی و شیمیایی سنگ می‌شود.

جدول ۳- خلاصه نتایج حاصل از آزمایش‌های انجام شده

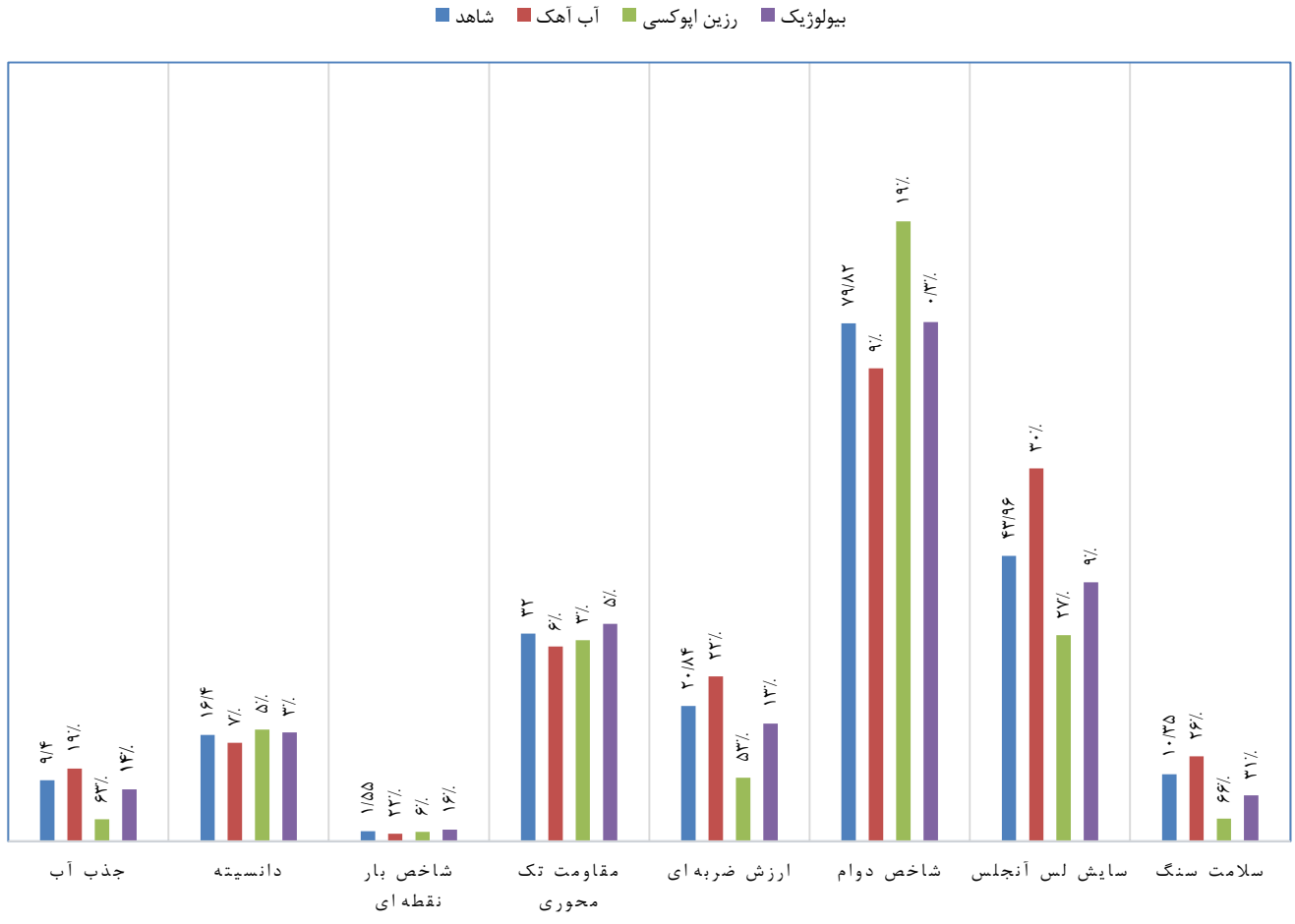
خصوصیات	پارامتر	نتایج آزمایش بر روی نمونه سنگ‌ها			
		شاهد	آب آهک	رزین اپوکسی	بیولوژیک
فیزیکی	جذب آب (٪)	۹/۴	۱۱/۲	۳/۴	۸
	دانسیته (KN/m^3)	۱۶/۴	۱۵/۲	۱۷/۲	۱۶/۸
مقاومتی	شاخص بار نقطه‌ای (MP)	۱/۵۵	۱/۲	۱/۴۵	۱/۸
	مقاومت تک محوری (MP)	۳۲	۳۰	۳۱	۳۳/۵
دوام داری مکانیکی	ارزش ضربه‌ای (٪)	۲۰/۸۴	۲۵/۴۴	۹/۸۱	۱۸/۱۳
	شاخص دوام (۱۵ سیکل) (٪)	۷۹/۸۲۰	۷۲/۸۴۹	۹۵/۵۰۸	۸۰/۰۰۳
	سایش لس‌آنجلس (٪)	۴۳/۹۶	۵۷/۴۸	۳۱/۷۵	۳۹/۸۹
دوام داری شیمیایی	سلامت سنگ (۱۰ سیکل) (٪)	۱۰/۳۵	۱۳/۱۲	۳/۵	۷/۱۱

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1396.13.26.8.6]

در حالی که وقتی نمونه استحکام بخش شده با دوغاب بیولوژیکی را با نمونه شاهد مقایسه می‌کنیم مشخص است که محلول بیولوژیکی توانسته است تخلخل سنگ را کاهش داده، باعث کاهش جذب آب و بهبود پارامترهای مقاومتی و بخشی از پارامترهای دوام داری شود. کاهش تخلخل سبب شده تا سنگ در برابر سولفات سدیم نیز مقاوم‌تر عمل کند.

پس از بررسی نتایج، نسبت امتیازدهی به هر پارامتر، به صورت مساوی تقسیم شد. به این ترتیب برای خصوصیات فیزیکی به هر کدام ٪۵۰ امتیاز از هر رده و برای خصوصیات مقاومتی نیز نسبت امتیازدهی به هر پارامتر به نسبت مساوی٪۵۰ و برای دوام داری مکانیکی هر کدام به نسبت مساوی تقسیم بر سه و به هر پارامتر ٪۳۳/۳۳ امتیاز و برای دوام داری شیمیایی نیز امتیاز مربوطه به طور کامل اختصاص یافت. بنابراین نحوه اعمال امتیازات به پارامترهای خصوصیات هر یک از نمونه‌ها مطابق جدول ۴ ارائه شد. در جدول ۵ مقدار امتیاز به خصوصیات نمونه‌ها بر اساس معیار تلخابلو [۱۲, ۲۵]. قابل مشاهده است. همانطور که در جدول ۴ مشخص است خصوصیات فیزیکی نمونه‌هایی که با استفاده از رزین اپوکسی بهبود یافته امتیاز بیشتری نسبت به سایر استحکام بخش‌ها داشته در حالی که برای خصوصیات مقاومتی، پارامتر بار نقطه‌ای نمونه شاهد و استحکام بخشی شده با دوغاب بیولوژیکی امتیاز بیشتری نسبت به سایر استحکام بخش‌ها داشته و مقاومت تک محوری برای همه استحکام بخش‌ها شاخص کیفیت یکسانی دارد. در مورد خصوصیات دوام داری مکانیکی برای دو پارامتر ارزش ضربه‌ای و شاخص دوام نمونه بهبود یافته با رزین اپوکسی امتیاز بیشتری نسبت به سایر نمونه‌ها دارد. همچنین در مورد آزمایش سایش لس آنجلس همه نمونه‌ها به غیر از نمونه استحکام بخش شده با آب آهک در یک رده شاخص کیفیت قرار گرفته که نشان دهنده این است که آب آهک باعث کاهش سایش لس آنجلس می‌شود. دوام داری شیمیایی با پارامتر سلامت سنگ بررسی می‌شود که در آن نمونه‌های استحکام بخش شده با رزین اپوکسی و دوغاب بیولوژیکی امتیاز بیشتری نسبت به دو نمونه دیگر دارد. بنابراین این چنین استنباط می‌شود که نمونه‌های استحکام بخشی شده با رزین اپوکسی و دوغاب بیولوژیکی در مجموع امتیاز بیشتری نسبت به دو نمونه دیگر دارد و باعث مقاوم‌تر شدن سنگ می‌شود.



شکل ۸- مقایسه خواص مهندسی نمونه‌های بهسازی شده با نمونه شاهد

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1396.13.26.8.6]

همچنین رزین اپوکسی باعث شده تا شاخص کیفیت پارامتر جذب آب سنگ لوماشل از رده B به A ارتقا یابد به علاوه باعث شده تا دانسیته آن هم از رده C به B ارتقا یابد. در مورد پارامتر ارزش ضربه‌ای و شاخص دوام چنانچه در جدول ۴ قابل مشاهده است رزین اپوکسی باعث شده تا سنگ لوماشل به ترتیب از رده B به A و از رده C به A ارتقا یابد. همچنین آب آهک باعث شده تا پارامتر شاخص دوام و سایش لس آنجلس سنگ لوماشل کاهش شاخص کیفیت را به ترتیب از رده C به D و از رده B به C به دنبال داشته باشد. در پارامتر سلامت سنگ، دوغاب بیولوژیکی و رزین اپوکسی شاخص کیفیت سنگ لوماشل را از رده B به A ارتقا داده است. با توجه به جدول ۵ مجموع امتیازهای نمونه استحکام بخشی شده با آب آهک نسبت به نمونه شاهد ۸/۵٪ کاهش یافته است. این در حالی است که مجموع امتیازهای نمونه‌های استحکام بخشی شده با رزین اپوکسی و دوغاب بیولوژیکی به ترتیب ۱۷٪ و ۷٪ افزایش یافته است. همچنین بر اساس مجموع امتیازات فوق سنگ بهسازی شده با رزین اپوکسی یک رده ارتقا کیفیت داشته و از رده B به A ترفیع یافته است. اگرچه رزین اپوکسی باعث شده تا سنگ بهسازی شده یک رده ارتقا کیفیت داشته باشد اما نسبت به دوغاب بیولوژیکی هزینه بیشتری داشته و برای حجم زیاد سنگ‌هایی که برای موج شکن‌ها استفاده می‌شود مقرون به صرفه نیست. این در حالی است که دوغاب بیولوژیکی قابلیت این را دارد با هزینه کمتر از رزین اپوکسی سنگ را بهبود بخشد.

جدول ۴- رده کیفیت نمونه سنگ‌های مورد مطالعه پس از انجام آزمایش (NS = شاهد، LS = آب آهک، RS = رزین اپوکسی، BS = دوغاب بیولوژیکی)

خصوصیات	پارامتر	رده (شاخص کیفیت)				
		E	D	C	B	A
فیزیکی	جذب آب (٪)				LS BS NS	RS
	دانسیته (KN/m^3)		LS BS NS	RS		
	امتیاز	۵	۱۰	۱۵	۲۰	۲۵
مقاومتی	شاخص بار نقطه‌ای (MP)		LS RS	BS NS		
	مقاومت تک محوری (MP)			RS LS BS NS		
	امتیاز	۵	۱۰	۱۵	۲۰	۲۵
دوام داری مکانیکی	ارزش ضربه‌ای (٪)			LS BS NS		RS
	شاخص دوام (۱۵ سیکل) (٪)		LS	BS NS		RS
	سایش لس‌آنجلس (٪)			RS BS NS LS		
	امتیاز	۵	۱۰	۱۵	۲۰	۲۵
دوام داری شیمیایی	سلامت سنگ (۱۰ سیکل) (٪)			NS	LS	BS RS
	امتیاز	۵	۱۰	۱۵	۲۰	۲۵
	مجموع امتیازها	≤۲۰	۲۰-۴۰	۴۰-۶۰	۶۰-۸۰	۸۰-۱۰۰

جدول ۵- امتیازدهی به خصوصیات نمونه‌ها بر اساس معیار تلخابلو

خصوصیات	پارامتر	امتیاز هر استحکام دهنده			
		شاهد	آب آهک	رزین اپوکسی	بیولوژیک
فیزیکی	جذب آب (٪)	۵	۵	۷/۵	۵
	دانسیته (KN/m^3)	۱۰	۱۰	۱۲/۵	۱۰
مقاومتی	شاخص بار نقطه‌ای (MP)	۷/۵	۵	۵	۷/۵
	مقاومت تک محوری (MP)	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰
دوام داری مکانیکی	ارزش ضربه‌ای (٪)	۶/۶۶	۶/۶۶	۸/۳۳	۶/۶۶
	شاخص دوام (۱۵ سیکل) (٪)	۵	۳/۳۳	۸/۳۳	۵
	سایش لس‌آنجلس (٪)	۶/۶۶	۵	۶/۶۶	۶/۶۶
دوام داری شیمیایی	سلامت سنگ (۱۰ سیکل) (٪)	۲۰	۲۰	۲۵	۲۵
	مجموع امتیازها	۷۱	۶۵	۸۳	۷۶

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1396.13.26.8.6]

بعلاوه گزینه مناسبی برای محیط زیست و دوستدار محیط می‌باشد که در مقایسه با رزین اپوکسی که از مواد شیمیایی مختلف برای تهیه آن استفاده می‌شود بهتر است. همچنین رزین اپوکسی قابلیت نفوذ به درون خلل و فرج سنگ را ندارد و باید به صورت دوره‌ای برای استحکام بخشی استفاده شود اما دوغاب بیولوژیکی این توانایی را دارد که در خلل و فرج و ترک‌های سنگ نفوذ کند و باعث اتصال قطعات سنگ به یکدیگر شود. بنابراین اینگونه می توان بیان کرد که:

۱- در روش استحکام بخشی با آب آهک به نظر می‌رسد که ذرات ریز کلسیم هیدروکسید، همراه با آب در سنگ نفوذ کرده و عوامل مخرب را تشدید می‌کنند بنابراین باعث کاهش امتیاز سنگ نیز می‌شود. رطوبت ایجاد شده از محلول کلسیم هیدروکسید در سنگ به علت اندر کنشی که با سطوح کانی‌های تشکیل دهنده دارد و تغییراتی که در مشخصات این سطوح و طبیعت پیوند بین آن‌ها ایجاد می‌کند، مقاومت و مشخصات ژئوتکنیکی سنگ را کاهش می‌دهد.

۲- بر اساس مجموع امتیازات فوق سنگ بهسازی شده با رزین یک رده ارتقا کیفیت از رده B به A داشته است.

۳- استفاده از رزین برای استحکام‌بخشی سنگ لوماشل، نسبت به استفاده از آب آهک و محلول بیولوژیکی دارای ارجحیت است، اما به دلیل ساختار فیزیکوشیمیایی متفاوت این ماده نسبت به سنگ مورد مطالعه و نفوذ پذیری بسیار ناچیز در سنگ، می‌توان آن را یک استحکام بخش سطحی موقت به حساب آورد.

۴- استفاده از محلول‌های بیولوژیکی روشی جدید برای بهسازی خاک و نمونه‌های سنگی است و با توجه به اینکه استفاده از رزین بایستی به صورت دوره‌ای باشد و به لحاظ اقتصادی نیز نسبت به دیگر استحکام بخش‌ها گران‌تر می‌باشد. بنابراین محلول‌های بیولوژیک ارجحیت بیشتری نسبت به رزین‌های اپوکسی دارد. رزین‌ها صرفاً یک استحکام بخش سطحی است که با توجه به اجزای تشکیل دهنده آن به صورت یک لایه محکم به سطح رویی سنگ چسبیده و خلل و فرج‌های آن را پوشش داده است. در روش بیولوژیک، میکروارگانیسم‌ها به دورن خلل و فرج سنگ نفوذ کرده باعث پر شدن آنها می‌شود و افزایش استحکام سنگ را به دنبال دارد. بنابراین در مقایسه با روش‌های رزین و دوغاب آهکی مطلوب‌تر است. جلبک‌های ایجاد شده در سطح سنگ باعث ایجاد یک پوشش سطحی شده که از نفوذ نمک‌های سولفات به داخل خلل و فرج سنگ جلوگیری نمی‌کند و این نمک‌ها باعث تخریب سنگ می‌شود.

۵- مجموع امتیازهای نمونه استحکام بخشی شده با آب آهک نسبت به نمونه شاهد ۸/۵٪ کاهش یافته است. در حالی که مجموع امتیازهای نمونه‌های استحکام بخشی شده با رزین اپوکسی و دوغاب بیولوژیکی به ترتیب ۱۷٪ و ۷٪ افزایش یافته است.

۴- نتیجه گیری

هدف از انجام این تحقیق بهبود ویژگی‌های دوام داری سنگ‌های لوماشل، که در جنوب ایران به عنوان مصالح اصلی در ایجاد موج شکن‌ها استفاده می‌شود است زیرا بهبود ویژگی‌های فیزیکی، مقاومتی و دوام داری این نوع سنگ‌ها مقرون به صرفه‌تر از حمل سنگ از نواحی دیگر است. در این تحقیق تعداد ۲۰ نمونه سنگ لوماشل از معدن هلر درگهان گرفته و پس از استحکام بخشی با مواد مختلف مورد آزمایش قرار گرفت. در این تحقیق از سه روش استحکام بخشی با آب آهک، رزین اپوکسی و دوغاب بیولوژیکی برای بهبود خصوصیات فیزیکی، مقاومتی و دوام داری سنگ استفاده شد.

ماده اصلی در استحکام بخشی با آب آهک، سنگ آهک (کربنات کلسیم) می‌باشد که باعث پر شدن حفرات و خلل و فرج سنگ و نهایتا موجب استحکام سنگ می‌شود.

در استحکام بخشی سنگ با رزین‌های اپوکسی از مواد شیمیایی که تشکیل دهنده رزین‌ها استفاده می‌شود. رزین اپوکسی یک استحکام بخش سطحی است و به صورت یک لایه محکم به سطح رویی سنگ چسبیده و خلل و فرج‌های آن را پوشش داده این ماده نفوذ خیلی کمی دارد.

همچنین در استحکام بخشی با میکروارگانیسم از باکتری *Sporosarcina Pasteurii* استفاده شد که باعث تشکیل سیمان کلسیتی می‌شود و خلل و فرج سنگ را پوشش داده و باعث استحکام سنگ می‌شود. بنابراین این روش ارجحیت بیشتری نسبت به روش های دیگر دارد.

۵- مراجع

1- Talkhablo, M ., (2007), *Evaluation of rock engineering characteristics and providing suitable criteria for use in marine structures of southern coast of Iran*, phD thesis, Department of geology. Tarbiat Modares University., (In Persian)

2- Nasiri rad, K., (2012), *Methods of making breakwaters* ,.Tehran: Fadak Isatias Publications. (In Persian)

3-Talkhablo, M., (2007), ,*Evaluation of the engineering features of rocks and the proposed criteria for the selection of rock materials for the construction of rock crushers on the southern coast of Iran* .journal of Earth sciences, vol 66. (In Persian)

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1396.13.26.8.6]

4-Ghanbarian , M., (2010), *Rock mass crushers Volume I (types of breakwaters, general design principles)* Construction site of Khatam alanbia, Noah, Abnos publication. (In Persian)

5- Jalali, H., (1990), *The importance of stone durability in the stability of breakwaters* ,The first international conference on marine and coastal structure, Tehran. (In Persian)

6- Nicodel, M.R., (1990), *Study of Stone Degradability Recognition Criteria*, department of geology., Tarbiat modares university. (In Persian)

7- Garcia, R. and Kobayashi, N., (2014), *Damage variations on low-crested breakwaters.* Coastal Engineering Proceedings,.

8- Evans, B., (2013), *Repairs to Timber Cribway and Construction of Armour Stone Breakwater and Wharf in Belleoram, Newfoundland.* Undergraduate Engineering Research and Scholarship,.

9-Hasanli, H.R., Shafie far, V., and Nicodel, M.R., (2006), *Investigation the performance of armor stone breakwaters rocky northern coast of Persian Gulf (Bushehr)*, Journalof geology., vol 61,. (In Persian)

10- Baedecker, P. A., and Reddy, M. M. (1993). *The erosion of carbonate stone by acid rain: Laboratory and field investigations*. Journal of chemical education, Vol, 70(2),. p, 104.

11- Selwits, C., (1992), *Epoxy Resins in Stone Conservation.* The Getty Conservation Institute, Library of Congress Cataloging-in-Publication Data

12- Aghayari, A., (2012), *Investigating variations of bioslurry properties on laboratory scale ,department of rock mechanic*, Isfahan University Of Technology. (In Persian)

13- Troiano, F., et al., (2013), *Successful combination of chemical and biological treatments for the cleaning of stone artworks.* International Biodeterioration & Biodegradation 85: p. 294-304.

14- Richardson, A., Coventry, K.A., Forster, A.M., and Jamison. A., (2014), *Surface consolidation of natural stone materials using microbial induced calcite precipitation.* Structural Survey, 32(3), p.265-278.

15- Uranjek, M., Bosiljkov, V., Žarnić, R., and Bosiljkov, V. B. (2012). *Lime based grouts for strengthening of historical masonry buildings in Slovenia*. In Historic Mortars (p. 393-409). Springer, Dordrecht.

16- Jorne, F., Henriques, F. M., and Baltazar, L. G. (2015). *Evaluation of consolidation of different porous media with hydraulic lime grout injection*. Journal of cultural heritage, Vol.16(4), P.438-451.

17- Lemaire, K., Deneele, D., Bonnet, S., and Legret, M. (2013). *Effects of lime and cement treatment on the physicochemical, microstructural and mechanical characteristics of a plastic silt*. Engineering Geology, Vol.166, p, 255-261.

18- Anagnostopoulos, C. A., Kandiliotis, P., Lola, M., and Karavatos, S. (2014). *Improving Properties of Sand Using Epoxy Resin and Electrokinetics*. Geotechnical and Geological Engineering, Vol. 32(4), p, 859-872.

19- Cheng, L., Shahin, M. A., Cord-Ruwisch, R., Addis, M., Hartanto, T., and Elms, C. (2014). *Soil stabilisation by microbial-induced calcite precipitation (micp): investigation into some physical and environmental aspects.* In 7th International Congress on Environmental Geotechnics: iceg2014 (p. 1105). Engineers Australia.

20- Neupane, D., Yasuhara, H., & Kinoshita, N. (2015). *Evaluation of enzyme mediated calcite grouting as a possible soil improvement technique*. Computer Method and Recent Advances in Geomechanics; Oka, F., Murakami, A., Uzuoka, R., Kimoto, S., Eds, p, 1169-1172.

21- Gurbuz, A., Sari, Y. D., Yuksekdag, Z. N., and Cinar, B. (2011). *Cementation in a matrix of loose sandy soil using biological treatment method.* African Journal of Biotechnology, Vol. 10(38), p, 7432-7440.

22- Chu, J., Ivanov, V., Naeimi, M., Stabnikov, V., and Liu, H. L. (2014). *Optimization of calcium-based bioclogging and biocementation of sand*. Acta Geotechnica, Vol. 9(2), p, 277-285.

23- Nasehi, A.R., (1997), *Determination of suitable criteria for the use of rock in the construction of offshore structures, southeast of Iran (Chabahar)* , Department of geology. Tarbiat Modares University., (In Persian)

24- Zamanian, M., (2009), *Comparison of Dispersion of Nanoparticles of Calcium Hydroxide in Alcohol with Lime Milk Method in the Strengthening of Limestone Works* ,Isfahan art university , (In Persian)

25- Aghayari., A and Baghbanan.,A, (2012), *Laboratory studies Effect of the use of biological methods on improving the loss of soils*, Second tunnel conference, (In Persian)

26- Sari, Y. D. (2015). *Soil strength improvement by microbial cementation*. Marine Georesources & Geotechnology, Vol., 33(6)., p, 567-571.

27- Dhami, N. K., Reddy, M. S., and Mukherjee, A. (2014). *Application of calcifying bacteria for remediation of stones and cultural heritages*. Frontiers in microbiology, Vol. 5., p. 304.

28- Shahriar, K., (2011), *Rock Mechanice* - department of Mining and Metallurgy - Amir Kabir University of Technology, (In Persian)

29- Fahimi far, A., Soroush, H., (2001), *Rock mechanic tests*, (Theoretical Foundations and Standards), Vol. 1 (Laboratory Tests. J. First: A Joint-Stock Company of Soil Mechanics and Laboratory. (In Persian)

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1396.13.26.8.6]