بررسی مقاومت و ساختار خاک‌های مارنی تثبیت شده با سیمان و نانوسیلیس

محمد امیری*، عادل عساکره، حسین آتشپوش؛
دانشگاه هرمزگان، گروه مهندسی عمران

تاریخ: دریافت ۹۷/۰۸۱۰/۲٤ پذیرش ۹۸/۰۲/۱٦

چکیده

فرسایش‌پذیری شدید در مجاورت هوا و آب و تورم‌پذیری زیاد از مشکلات اصلی خاک‌های مارنی است که موجب ناپایداری در بستر پروژه‌های عمرانی می‌شود. اصلاح شیمیایی خاک با سیمان در بسیاری از پژوهش‌ها بررسی شده است، اما تغییرات ریزساختاری و بافت خاک‌ها در فرایند تثبیت و هم‌چنین نقش نانوذرات سیلیس به‌صورت جامع بررسی نشده است. بر این اساس هدف پژوهش حاضر ارزیابی ریزساختاری بهبود خصوصیات مهندسی خاک‌های مارنی با سیمان در حضور نانوسیلیس و تشکیل ترکیبات جدید ناشی از فرآیند تثبیت است. در این راستا پس از تعیین خصوصیات ژئوتکنیکی خاک مارن، بهبود ویژگی‌های مهندسی نمونه‌های تثبیت شده با درصدهای مختلف سیمان و نانوسیلیس بعد از پایان دوره عمل‌آوری از طریق انجام آزمایش بزرگ ساختاری مقاومت فشاری محدود نشده (UCS) و ریزساختاری (pH، پراش اشعهٔ ایکس (XRD)، تصاویر میکروسکوپ الکترونی پویشی (SEM) و طیف‌سنجی پاشندگی انرژی (EDX)) تجزیه و تحلیل شد. بر اساس نتایج پژوهش حاضر حضور نانوسیلیس در فرایند تثبیت خاک مارنی به‌وسیلهٔ سیمان، منجر به افزایش فعالیت‌های پوزولانی و رشد نانوساختارهای هیدرات سیلیکات کلسیم (C-S-H) و توزیع یکنواخت این نانوساختارها می‌شود. بر اساس نتایج پژوهش حاضر افزایش مقدار نانوسیلیس تا ۱٪ از لحاظ ریزساختاری و درشت ساختاری مؤثر است و خصوصیات مهندسی خاک‌های مارنی در نمونهٔ اصلاح شده با ٤٪ سیمان و ۱٪ نانوسیلیس میزان مقاومت فشاری را در طی ۲۸ روز به ۳۰/۵ kg/cm^2 افزایش داده و نسبت به نمونه مرجع مقاومت فشاری حدود ۳۰ برابر افزایش یافته است.

واژه‌های کلیدی: مارن، نانوسیلیس، مقاومت فشاری محدود نشده، C-S-H، XRD.

*نویسنده مسئول amirii@hormozgan.ac.ir

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.1.7.5]

مقدمه

مارن‌ها از خاک‌های مسئله‌دار هستند که در صورت قرار گرفتن در معرض جریان آب متورم می شوند و مشکلاتی را در پایداری بستر پروژه‌های عمرانی ایجاد می‌کنند. یکی از روش‌های اصلاح شیمیایی خاک استفاده از مواد افزودنی مانند سیمان، آهک و نانوذرات است [۱]، [۲]. از سوی دیگر گسیختگی‌های شدید در بسیاری از خاک‌های مارنی تثبیت شده به روش شیمیایی گزارش شده است، براین اساس عمدتاً عوامل مکانیکی صرف برای توضیح این گسیختگی‌ها چندان جامع نیست [۱-۵].

در سال ۱۹۸۲ مک-کارتی [٦] مارن را به‌صورت یک سنگ سیمانی نرم معرفی کرد. میچل [۷] و کاهاواش در سال ۱۹۸۹ [۸] مارن را رسوب کربناتی با ۵۵-۸۰ ٪ کربنات معرفی کردند. مشخصات مارن تابع مقدار کربنات و نوع و مقدار کانی‌ها در بخش رسی است [۹]. عموماً بخش رسی مارن شامل پالی‌گورسکایت و سپیولایت است که عملکرد مارن را کنترل می‌کند. این دو کانی، برخلاف سایر کانی‌های رسی، دارای ساختار زنجیره‌ای است و معمولاً با سایر کانی‌های غیرسیلیکاتی، مانند کربنات‌ها و سولفات‌ها همراه‌اند [۱۰]-[۱۲]. خاک‌های مارنی، به‌رغم مقاومت زیاد در حالت خشک، به میزان چشم‌گیری در صورت اشباع شدن دچار افت مقاومت می‌شوند. میزان این افت تا حد ٪۸۵ نیز گزارش شده است [۱۰]. این خاک هم‌چنین رفتار رمبنده، واگرا، تورمی و دوام به وارفتگی کم را در حضور آب بروز می‌دهند [۱۳]. تجمع آب‌های حاصل از نزولات جوی و آب‌های زیرزمینی سبب سست شدن مارن‌ها شده، در نتیجه لایه‌های فوقانی ناپایدار شده و بر اثر نیروی وزن یا نیروی حاصل از زمین‌لرزه رانش می‌کند [۲]، [۳].

پالی‌گورسکایت و سپیولایت کانی‌های رسی تشکیل‌دهندهٔ خاک مارن هستند که دلیل اصلی بر بی‌ثباتی، کاهش ظرفیت باربری و تورم خاک مارن است. پالی‌گورسکایت و سپیولایت فرمول ساختاری متفاوتی دارند. این را می‌توان به توزیع آلومینیوم، منیزیم و سیلیس اختصاص داد که مقدار چشم‌گیری از آن به آلومینیوم و منیزیم مربوط می‌شود. ساختار زنجیره‌ای این کانی‌ها با ساختار صفحه‌ای شکل کانی‌های رسی متفاوت است [۱۰]، [۱۱].

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.1.7.5]

درگذشته برای تثبیت خاک در احداث پروژه‌های عمرانی از آهک نیز استفاده شده است [٤]، [٥]. استفاده از سیمان در فرآیند تثبیت رس نرم توسط پژوهش‌گران بررسی شده است. اوحدی و همکاران [١٤]، به بررسی تحکیم پوزولانی رس نرم تثبیت‌شده با آهک و سیمان پرداختند و سه جنبهٔ مهم از تثبیت خاک با آهک و سیمان که شامل: ۱. تعیین درصد بهینهٔ آهک و سیمان برای تثبیت خاک، ۲. ارائهٔ واژه فنی جدید به دانش ژئوتکنیک با عنوان تحکیم پوزولانی که در پایدارسازی رس نرم با آهک و سیمان رخ می‌دهد و ۳. ارائهٔ یک معیار علمی برای تعیین درصد بهینه ماده تثبیت‌کننده با دانش تنش پیش تحکیمی و شاخص تورم را بررسی کردند. اوحدی و یانگ [١١]، نقش کانی‌های رس در رفتار خاک مارن که شامل پالی-گورسکایت و سپیولایت است، بررسی کردند و برخی از جنبه‌های ژئوتکنیکی و ژئوتکنیک زیست‌محیطی از رفتار خاک مارن را، بررسی کردند. العمودی و همکاران [١٤]، تثبیت خاک مارن شرق عربستان را برای استفاده در جاده سازی بررسی کردند. بهبود ظرفیت باربری با استفاده از آزمایش CBR و آزمون‌های مقاومت فشاری محصور نشده و وارفتگی بررسی کردند. نتایج نشان داد که سیمان نسبت به آهک مقاومت بیش‌تری نشان داده است.

سیمان موجب بهبود در رفتار خمیری، کارپذیری و افزایش مقاومت فشاری خاک می‌شود. به‌طورکلی این افزایش مقاومت با واکنش‌های سیمانتاسیون اولیه و نهایی در ماتریس خاک- سیمان صورت می‌گیرد. سیمانتاسیون اولیه به‌دلیل پدیدهٔ هیدرولیز در سیمان پرتلند انجام میشود که بر اساس فرایند هیدراسیون، ژل‌ها و ترکیبات مختلفی تشکیل می‌شود. سیمان پرتلند یک ماده ناهمگن حاوی ترکیبات (C_3S)، (C_2S)، (C_3A) و (C_4AF) است. مؤلفه‌های موجود در سیمان پرتلند، با آب واکنش می‌دهد و ترکیباتی به‌شرح رابطهٔ (۱) تشکیل می‌شود [١٥].

$$2(CaO.SiO_2) + 6H_2O \rightarrow 3CaO.2SiO_2.\ 3H_20 + 3Ca(OH)_2$$
$$2(2CaO.SiO_2) + 4H_2O \rightarrow 3CaO.2SiO_2.\ 3H_20 + Ca(OH)_2$$
$$4CaO\ .Al_2O_3\ Fe_2O_3 + 10H_2O + 2\ Ca(OH)_2 \rightarrow 6CaO.\ Al_2O_3.\ Fe_2O_3.12H_2O \quad (۱)$$
$$3CaO\ .Al_2O_3 + 11H_2O + Ca(OH)_2 \rightarrow 3CaO.\ Al_2O_3.\ Ca(OH)_2.12H_2O$$
$$3CaO\ .Al_2O_3 + 10H_2O + CaSO_4.2H_2O \rightarrow 3CaO.\ Al_2O_3.\ CaSO_4.12H_2O$$

نتایج تجربی نشان‌دهندهٔ بهبود خواص ژئوتکنیکی مارن به‌وسیلهٔ تثبیت با سیمان است که نشان‌دهندهٔ کاهش شاخص پلاستیسیته، تورم آزاد و فشار تورم است. این پیشرفت‌ها عمدتاً

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.1.7.5]

به‌دلیل تغییرات بافت در طی تثبیت سیمان است که به‌وسیلهٔ افزایش اندازهٔ ذرات و تشکیل ترکیبات پوزولانی منعکس می‌شود [۱٦].

نانو مواد ریزی هستند که حداقل یک بعد آن‌ها در مقیاس نانومتر است. در مقیاس نانو، خصوصیات الکترونیکی، مغناطیسی، نوری و شیمیایی تغییر می‌یابد که این امر در مقیاس ماکرو نمی‌تواند وجود داشته باشد. مشخصه اصلی نانو ذرات، اندازهٔ کوچک، توزیع دانه‌بندی با یک سطح پایین آگلومراته شدن و قابلیت پخش بالا است. اغلب نانو موادی که برای تغییر خصوصیات ژئوتکنیک خاک‌ها استفاده شده است، نانو ذرات سیلیس است که روی خصوصیات تحکیم، شاخص نفوذپذیری و پارامترهای مقاومتی خاک تأثیر می‌گذارد [۱۷]. نانو ذرات سیلیس به‌وسیلهٔ گالاگر [۱۸]، [۱۹] برای افزایش چسبندگی خاک‌ها و کاهش ویسکوزیته آن‌ها استفاده شد و رفتار ماسه بهبودیافته با نانومواد در شرایط بارگذاری چرخه‌ای تحلیل شد. به‌عنوان یک نتیجه، مشخص شد که چسبندگی وابسته به درصد افزایش نانوذرات است. پاتریسیا و همکاران [۱۹] در ایالات متحده نانو ذرات را در خاک مخصوصی که شامل ماسه با دانسیته بالا بود استفاده کردند و گزارش کردند که بعد از اعمال زلزله مصنوعی و ارزیابی نشست خاک، ٤۰ ٪ بهبود در میزان نشست خاک اتفاق افتاده است.

اصلاح خاک با سیمان به‌دلیل مؤثر و اقتصادی بودن آن روشی متداول برای بهبود خصوصیات مقاومتی خاک به‌شمار می‌رود. پژوهش‌های انجام شده نشان می‌دهند که تثبیت با سیمان، ساختار خاک، خصوصیات خمیری خاک، روانی، پراکندگی، تورم و انقباض، رفتار نشست و نفوذپذیری را تغییر می‌دهد و موجب بهبود خواص ژئوتکنیکی خاک می‌شود؛ اما از سوی دیگر تشکیل ترکیبات متورم شونده‌ای مانند اترینگایت و تاموسایت در فرایند تثبیت با سیمان در خاک‌های مارنی موجب شکست فرایند تثبیت شده است [۱۰]. هم‌چنین تأثیر نانوسیلیس بر اثر بخشی فرایند تثبیت به‌صورت جامع ارزیابی نشده است. بر این اساس هدف این پژوهش تعیین تأثیر نانوسیلیس بر شدت بخشی فرایند تثبیت خاک‌های مارنی در فرایند تثبیت و تعیین میزان سیمان و نانوسیلیس مورد نیاز برای انجام واکنش‌های پوزولانی مارن–سیمان در کوتاه مدت و بلندمدت از منظر ریزساختاری و تغییر بافت خاک طی زمان است.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.1.7.5]

مواد و روش‌ها

خاک استفاده شده در این پژوهش، نمونهٔ مارن غرب شهر بندرعباس است که در محدودهٔ ایستگاه راه‌آهن و در حاشیهٔ شمالی خلیج فارس قرار دارد. در این منطقه شیب‌های طبیعی و مصنوعی دچار ناپایداری می‌شوند. هم‌چنین شکست‌های نسبتا گسترده‌ای در بسیاری از پروژه‌های ژئوتکنیکی از قبیل گسیختگی در فونداسیون‌ها، شیب‌ها و ترک‌های کششی در جاده‌ها گزارش شده است. ساختار و کانی‌های تشکیل‌دهندهٔ خاک مارن را می‌توان عامل اصلی بروز چنین مشکلاتی دانست. مشاهدات حاکی از آن است که بیش‌تر خرابی‌ها پس از بارندگی رخ داده است. این نمونه‌ها از نظر زمین‌شناسی متعلق به سازند میشان و سن آن‌ها میوسن زیرین تا میانی است [۱۰]. ساختار و کانی‌های تشکیل‌دهنده خاک مارن را می‌توان عامل اصلی بروز چنین مشکلاتی دانست [۱۰]. مشاهدات انجام شده در منطقه حاکی از آن است که بیش‌تر خرابی‌ها پس از بارندگی یا هوازدگی خاک‌های مارنی رخ داده است. بر اساس سیستم طبقه‌بندی متحد خاک (USCS)، خاک مارن بررسی شده از نوع خاک رس با خصوصیات خمیری کم (CL) است و ۹۵٪ وزنی آن از الک شمارهٔ ۲۰۰ (کوچک‌تر از ۷۵ میکرون) عبور کرده است. سیمان استفاده شده سیمان تیپ ۲ بوده است و از شرکت سیمان خمیر تهیه شده است. تجزیهٔ شیمیایی سیمان استفاده شده در جدول ۱ آورده شده است. نانوسیلیس استفاده شده در این پژوهش به‌صورت پودری سفید رنگ و با خلوص ۹۸٪ از شرکت نانوساو تهیه شده است. مشخصات فیزیکی نانوسیلیس در جدول ۲ و تجزیهٔ شیمیایی نانوسیلیس در جدول ۳ ارائه شده است.

بخش اعظم آزمایش‌های انجام‌شده در این تحقیق بر اساس استاندارد ASTM انجام شده است [۲۰]. برای تعیین درصد کربنات خاک، از روش تیتراسیون استفاده شده است [۲۱]. برای تهیهٔ نمونه‌های اشعه ایکس (XRD) از همهٔ نمونه‌ها، یک گرم خاک خشک با دقت ۰/۰۰۱ گرم وزن شده و داخل تیوپ سانتریفیوژ ۵۰ میلی‌لیتر ریخته شد. سپس بعد از اضافه کردن۵۰ میلی‌لیتر از الکترولیت مورد نظر (آب مقطر) به خاک، این سوسپانسیون به‌مدت سه ساعت به‌وسیلهٔ لرزاننده الکتریکی کاملاً هم زده شد. پس از نگه‌داری نمونه‌ها به‌مدت ۲٤ ساعت برای اطمینان از حصول شرایط تعادل، این سوسپانسیون مجدداً به‌مدت سه ساعت

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.1.7.5]

به‌وسیلهٔ لرزاننده الکتریکی کاملاً هم زده شد و نمونه‌ها حدود ۱۲۰ ساعت دیگر نگه‌داری شد تا سیستم کاملاً همگن شود. سپس نمونه‌ها به‌مدت ٦۰ دقیقه به‌وسیلهٔ لرزاننده مجدداً هم زده شدند. در نهایت بین ۵ تا ۷ قطره از این سوسپانسیون روی اسلاید شیشه‌ای ریخته شد و پس از خشک شدن، با دستگاه پراش پرتو ایکس مدل (D8-ADVANCE) X-Ray Diffractometer آزمایش شدند [۲۲]، [۲۳]. برای تعیین میزان زاویهٔ اصطکاک داخلی (φ) و میزان چسبندگی (c) نیز آزمایش برش مستقیم بر اساس استاندارد ASTM D 3080 انجام شده است [۲۰]. در جدول ٤ برخی مشخصات ژئوتکنیکی و فیزیکی نمونه‌های بررسی شده در این پژوهش ارائه‌شده است. هم‌چنین برای بررسی ساختار و بافت، نمونه‌ها به‌وسیلهٔ دستگاه میکروسکوپ الکترونی پویشی مدل SEM-TESCAN-Vega تجزیه شدند.

ارزیابی پراش پرتو ایکس به‌عنوان یک معیار در تعیین ریزساختار خاک‌ها شناخته شده است. منحنی پراش پرتو ایکس خاک بررسی شده در شکل ۲ ارائه شده است. بر اساس منحنی پراش پرتو ایکس حدود ۳٤/۲۰ درصد این خاک از کانی‌های رسی است، قله (d_{001}=14.27 Å) مربوط به مونت‌موریلونیت (٤/۵ درصد)، قله‌های (d_{110}=2.08 Å، d_{121}=3.24 Å، d_{400}=3.17 Å) مربوط به کانی پالی‌گورسکایت (۱٦/۷ درصد)، قله (d_{001}=1.87 Å) مربوط به کانی سپیولایت (۳/۲ درصد)، قله (d_{001}=7.14 Å) مربوط به کانی کائولینیت (۹/۵ درصد) و حدود ٦۵/۸٪ کانی‌های غیررسی (۳۷ درصد کوارتز و ۲۸/۸٪ کانی کلسیت) تشکیل شده است [۲۳-۲٤].

جدول ۱. مشخصات شیمیایی سیمان

Parameters / Product type	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	K_2O	Na2O	T.ALK	SO_3	CL	LOI	C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF	f.lime
Cement II	21.54	4.95	3.82	63.24	1.55	0.75	0.48	0.97	2.43	0.021	1.15	48.2	25.45	6.65	11.62	0.85

جدول ۲. تجزیهٔ شیمیایی نانوسیلیس

SiO_2	CaO	Al_2O_3	Fe_2O_3	SO_2	TiO_2	Na_2O	K_2O	L.O.I
98.95	0.042	0.16	0.075	0.04	<0.01	0.07	0.01	0.42

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.1.7.5]

جدول ۳. مشخصه‌های فیزیکی نانوسیلیس

Color	Purity	Special surface area (m^2/g)	Particle Sice (nm)	Density (kg/m^3)
white	> 98٪	193	20-30	170

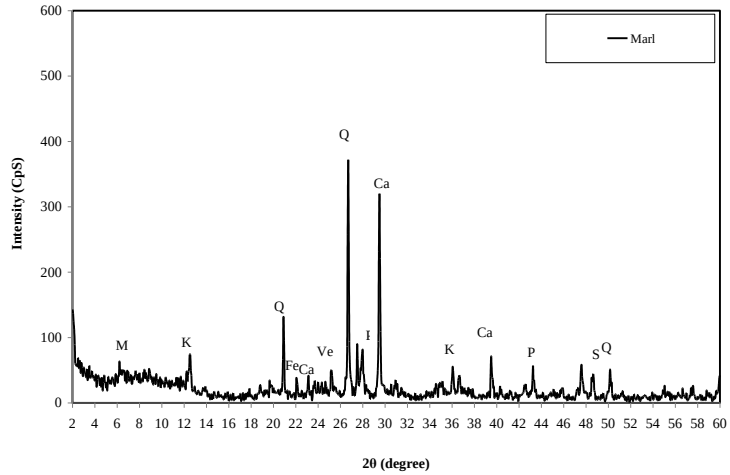
جدول ٤. برخی از مشخصات ژئوتکنیکی و فیزیکی نمونه رسی مارن برسی شده (بندرعباس)

Physical properties of South Marl		***Quantity measured***	***References***
Diameter less than 0.075 mm (%)		95	ASTM D422, [20]
Clay (%)		*36*	ASTM, D422-63 [20]
Silt (%)		*59*	ASTM, D422-63 [20]
Sand (%)		*5*	ASTM, D422-63 [20]
Strength Parameters	C (kg/cm^2)	*0.9*	
	φ^o	*24*	
Liquid Limit (%)		*41*	ASTM, D4318 [20]
Plastic Limit (%)		*20*	ASTM, D4318 [20]
Plasticity Index (%)		*21*	ASTM, D4318 [20]
pH (1:10 ; soil : water)		7.8	
Carbonate content (%)		27	[21]
Color		Green	
Classification		CL	ASTM, D3282 [20]
Maximum dry density. γ_d (gr/cm^3)		1.7	ASTM D698 [20]
Optimum water content (%)		19	ASTM D698 [20]
Mineral composition		Palygorskite, Sepiolite, Calcite, Quartz, Kaolinite, Illite, Feldspars	ASTM, D2216 [20]

برای تعیین درصد سیمان و نانوسیلیس مورد نیاز برای تثبیت خاک، آزمایش‌های فیزیکی و مکانیکی در مقادیر مختلف سیمان و نانوسیلیس انجام شده است. برای تعیین مقدار سیمان بهینه برای بهبود خصوصیات مهندسی، آزمایش‌های مکانیکی و فیزیکی انجام شد. ابتدا pH خاک و سیمان به‌طور جداگانه تعیین شد [۲۰]. سپس در مقادیر مختلف ۲ تا ۱۰ درصد سیمان و ۰/۵، ۱ و ۱/۵ درصد نانوسیلیس به خاک اضافه شد. بر این اساس ٤ گرم خاک رد شده از الک شمارهٔ ٤۰ و خشک شده در هوا را با دقت ۰/۰۰۱ گرم وزن کرده و درون بطری پلاستیکی حاوی درپوش به ظرفیت ۵۰ میلی‌لیتر (بیش‌تر) ریخته شد. سپس به مقدار ۲، ٤، ٦، ۸ و ۱۰ درصد وزنی خاک، سیمان و ۰/۵، ۱ و ۱/۵ درصد نانوسیلیس توزین شد. خاک، سیمان و نانوسیلیس درون بطری پلاستیکی ریخته و با هم مخلوط شدند. سپس ٤۰ میلی‌لیتر آب مقطر به بطری اضافه و به‌مدت دو ساعت به‌وسیلهٔ لرزاننده الکتریکی کاملاً هم‌زده شد. pH محلول‌ها بعد از ۱، ۲، ۳، ۷، ١٤، ۲۸، ٤۵ و ۹۰ روز نگه‌داری اندازه‌گیری شدند. مقادیر pH با استفاده از دستگاه pH متر مدل Istek-Ecomet اندازه‌گیری شد.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.1.7.5]



شکل ۱. پراش اشعهٔایکس نمونه مارن بررسی شده (بندرعباس)

P: پالی‌گورسکایت، S: سپیولایت، K: کائولینیت، M: مونت‌موریلونیت، ، Ca: کلسیت، Q: کوارتز

به‌منظور انجام آزمایش‌ها بر خاک تثبیت شده با مقادیر مختلف سیمان و نانوسیلیس، مقادیر ۲، ٤، ٦، ۸ و ۱۰ درصد سیمان و ۰/۵، ۱ و ۱/۵ درصد نانوسیلیس به‌صورت خشک به خاک اضافه شده است. بعد از اختلاط کامل در حالت خشک، آب برای رساندن نمونه‌ها به درصد رطوبت بهینه (۲۳ درصد) به نمونه‌ها اضافه شده، سپس نمونه‌ها به‌منظور توزیع یک‌نواخت رطوبت، ترکیب شدند تا به‌صورت همگن درآیند. نمونه‌های آزمایش مقاومت فشاری درون قالب‌های استوانه‌ای (به قطر ٤/٦۳ سانتی‌متر و ارتفاع ۹/۵ سانتی‌متر) با بیشینه وزن واحد حجم خشک برابر با ۱/۷ گرم بر سانتی‌متر مکعب ساخته شده و برای عمل‌آوری (برای زمان‌های ۱، ۳، ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه) نمونه‌ها در حمام رطوبت نگه‌داری شده و در انتهای زمان عمل‌آوری، آزمایش شد. شایان ذکر است تمام نمونه‌ها در دورهٔ عمل‌آوری در حمام رطوبت نگه‌داری شده و رطوبت محیط ثابت بوده است، بر این اساس افزایش مقاومت فشاری ناشی از خشک‌شدگی نمونه‌ها نیست.

بحث و بررسی

۱. تغییرات pH محیط واکنش در فرایند تثبیت

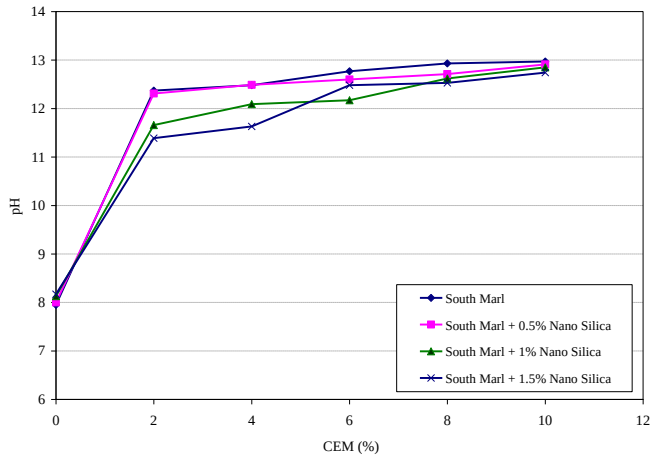
در این پژوهش تعیین مقدار بهینه سیمان و نانوسیلیس طبق اندازه‌گیری‌های pH و اعتباربخشی به‌وسیلهٔ آزمایش‌های پراش پرتو ایکس، SEM و مقاومت فشاری تک‌محوری

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.1.7.5]

انجام شده است. pH یک شاخص مهم برای اثربخشی فرایند تثبیت و پیشرفت واکنش‌های پوزولانی است. بل (۱۹۹٦) وابستگی pH به واکنش‌های آلومینوسیلیکات و واکنش پوزولانی را نشان داد و نتیجه گرفت که در برای شروع واکنش‌های پوزولانی و فرایند تثبیت خاک با استفاده از سیمان، pH محیط واکنش باید حدود ۱۲/٤ باشد [۲۰]. بر اساس نتایج ارائه شده در شکل (۲)، pH خاک طبیعی ۷/۸۰ است و با افزودن تنها ۲٪ سیمان pH مخلوط خاک-سیمان پس از ۷۲ ساعت تا ۱۲/۳۷ افزایش یافته است و با ٤٪ سیمان pH محیط به ۱۲/٤۸ رسیده است. بر اساس نتایج ارائه شده در شکل ۲ در نمونه‌های حاوی ۱۰٪ سیمان، pH محیط سوسپانسیون بعد از ۷۲ ساعت به ۱۲/۹۷ افزایش یافته است. چنان‌که از نتایج مشاهده می‌شود افزایش در میزان سیمان باعث افزایش در میزان pH خاک شده و در واقع با افزایش سیمان، در مدت زمان کوتاهی واکنش تبادل کاتیونی انجام شده‌است. بنابراین کاتیون دو ظرفیتی کلسیم (Ca^{++}) موجود در سیمان جای‌گزین کاتیون تک ظرفیتی سدیم (Na^{+}) در خاک می‌شود و با افزایش غلظت یون هیدروکسید (OH^{-})، pH محیط خاک افزایش می‌یابد [۲٦]، [۲۷].

بر اساس نتایج ارائه شده در نمونه حاوی ۲٪ سیمان و ۰/۵٪ نانوسیلیس pH محیط واکنش پس از ۲٤ ساعت حدود ۱۲/٤۵ است که نسبت به نمونهٔ فاقد نانوسیلیس هرچند روند کاهشی دارد اما این روند معنی‌دار نیست. از سوی دیگر در نمونه‌های حاوی ۱٪ نانوسیلیس و ۲٪ سیمان pH محیط واکنش بعد از ۲٤ ساعت به ۱۲/٤۵ و بعد از ۷۲ ساعت به حدود ۱۲/۳۱ رسیده است که کاهش یک واحدی را نشان می‌دهد در واقع حضور نانوسیلیس در فرایند اصلاح با سیمان موجب کاهش pH محیط واکنش می‌شود. در نمونه‌های اصلاح شده با ۱۰٪ سیمان و درصدهای مختلف نانوسیلیس نیز pH محیط سوسپانسیون نسبت به نمونه‌های اصلاح شده با همین درصد سیمان و فاقد نانوسیلیس روند کاهشی مشاهده می‌شود. به‌نحوی که در نمونه حاوی ۱/۵٪ نانوسیلیس pH محیط واکنش حدود ۰/۲ واحد کاهش یافته است. برای بررسی دقیق این تغییرات نمودار تغییرات pH محیط واکنش در طی زمان در شکل‌های ۳ و ٤ ارائه شده است.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.1.7.5]



شکل ۲. روند تغییرات pH نمونه‌های اصلاح‌شده با سیمان و نانوسیلیس پس از ۷۲ ساعت

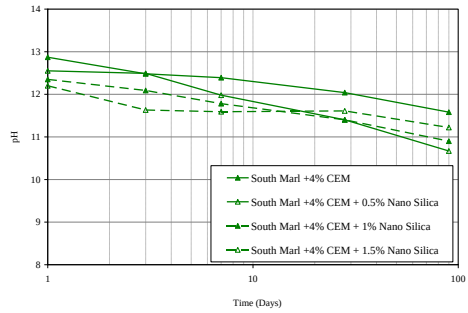
به‌منظور بررسی تأثیر زمان عمل‌آوری و تأثیر مقادیر مختلف سیمان و نانوسیلیس بر واکنش‌های بلندمدت (واکنش‌های پوزولانی)، تغییرات pH نمونه‌ها پس از اختلاط، تعیین و نتایج در شکل ۳ ارائه شده است. بر اساس تغییرات pH محیط واکنش، می‌توان شروع واکنش‌های پوزولانی را ارزیابی کرد. با افزایش زمان نگه‌داری میزان واکنش‌های پوزولانی افزایش می‌یابد. از سوی دیگر کاهش مقدار pH در طول دورهٔ عمل‌آوری بیان‌گر مصرف سیمان برای انجام واکنش‌های پوزولانی است.

در شکل ۳ تغییرات pH نمونه‌های اصلاح شده با ٤٪ سیمان و درصدهای مختلف نانوسیلیس ارائه شده است. براساس نتایج ارائه شده در تمام نمونه‌ها pH محیط واکنش در طی زمان کاهش می‌یابد. به‌نحوی که در نمونهٔ اصلاح شده با ٤٪ سیمان در طی زمان pH محیط واکنش حدود ۱/۳ واحد کاهش یافته و از ۱۲/٦٥ به ۱۱/۳ بعد از ۹۰ روز کاهش یافته است. از سوی دیگر در نمونه‌های حاوی نانوسیلیس pH اولیه محیط واکنش نسبت به نمونهٔ فاقد نانوسیلیس همواره روند کاهشی داشته است. در حقیقت در نمونه حاوی ۱٪ نانوسیلیس و ٤٪ سیمان pH محیط واکنش حدود ۱/٤٥ واحد طی ۹۰ روز کاهش یافته از ۱۲/۳٥ به ۱۰/۹۰ کاهش یافته است. در واقع کاهش سریع‌تر pH در نمونه‌های حاوی درصدهای

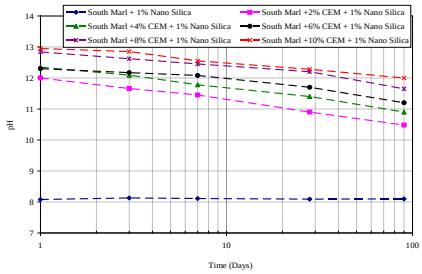
[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.1.7.5]

بیش‌تر سیمان و درصدهای بیش‌تر نانوسیلیس نشان از افزایش سرعت ایجاد واکنش‌های پوزولانی در خاک است [۲٦]، [۲۷].

در شکل ٤ بررسی تأثیر درصد سیمان در نمونه های حاوی ۱٪ نانوسیلیس ارائه شده است. در این شکل تغییرات pH در زمان عمل‌آوری ۱۰۰ روزه برای مقادیر مختلف ترکیبات خاک ـ سیمان (۲٪ تا ۱۰٪)– نانوسیلیس (۱٪) ارائه شده است. بر اساس نتایج ارائه شده در همهٔ نمونه‌ها افزایش درصد سیمان موجب افزایش pH محیط واکنش شده است. برای نمونه‌هایی که حاوی ۲٪ سیمان است، pH بعد از ۳ روز به آهستگی کاهش یافته است. در نمونه‌های حاوی ٤٪ سیمان و ۱٪ نانوسیلیس pH محیط واکنش کم‌تر از pH نمونه اصلاح شده با ٤٪ سیمان است. در نمونه حاوی ٦٪ سیمان و ۱٪ نانوسیلیس در ۱۰ روز ابتدایی pH محیط واکنش بیش از ۱۲ و بعد از ۱۰ روز pH محیط واکنش به کم‌تر از ۱۲ می‌رسد، شایان ذکر است در نهایت پس از ۹۰ روز pH محیط واکنش حدود ۱۱/۲ واحد است که نسبت به روز اول حدود ۱/۱ واحد کاهش یافته است.



شکل ۳. روند تغییرات pH نمونه‌های اصلاح‌شده با ٤٪ سیمان و نانوسیلیس طی زمان(دوره عمل آوری ۹۰ روزه)



شکل ٤. روند تغییرات pH نمونه‌های اصلاح‌شده با ۱٪ نانوسیلیس و سیمان طی زمان (دوره عمل‌آوری ۹۰ روزه)

کاهش pH در طول دوره عمل‌آوری را می‌توان با مصرف سیمان برای واکنش پوزولانی توضیح داد؛ زیرا تبادل یون مثبت (تبادل کاتیونی) بر غلظت یون هیدروکسید (OH^-) تأثیر می‌گذارد. کاهش آهستهٔ pH مربوط به نمونه‌های اصلاح‌شده، به‌علت فعالیت آهستهٔ واکنش پوزولانی است. به‌علاوه برای نمونه‌های اصلاح‌شده با ۲٪ سیمان و ۱٪ نانوسیلیس (در حدود مصرف اولیهٔ سیمان pH ≤۱۲) کاهش کم در مقدار pH، عدم رخداد واکنش پوزولانی یا

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.1.7.5]

واکنش بسیار کم پوزولانی را نشان می‌دهد. در حقیقت در تمام نمونه‌های حاوی سیمان و ۱٪ نانوسیلیس pH محیط واکنش طی ۹۰ روز حدود ۰/۹ تا ۱/۵ واحد کاهش یافته است.

۲ . تجزیهٔ ریزساختاری فرایند تثبیت

فرایند تثبیت خاک مارن- سیمان-نانوسیلیس به‌واسطهٔ تأثیر نهادن بر نیروهای بین پولک‌ها سبب تغییر در ریزساختار خاک‌های مارنی می‌شود [۱۲]، [۲۹]. ارزیابی طیف اشعهٔ ایکس به‌عنوان معیاری در تعیین ریز ساختار خاک‌ها شناخته شده است. به‌منظور امکان تفسیر رفتار مشاهده شده از دیدگاه ریزساختاری، پراش پرتو اشعهٔ ایکس نمونه‌های مارن و نمونه‌های حاوی درصدهای مختلف سیمان و نانوسیلیس تهیه و تجزیه و تحلیل شد.

شکل ۵ منحنی پراش پرتو ایکس نمونه‌های مارن و مارن اصلاح شده با ٤٪ سیمان و درصدهای مختلف نانوسیلیس (۰/۵، ۱ و ۱/۵ درصد) را پس از دورهٔ عمل‌آوری ۲۸ روزه را نشان می‌دهد. بر اساس نتایج ارائه شده در شکل ۵ در نمونه حاوی ٤٪ سیمان و درصدهای مختلف نانوسیلیس، افزایش سیمان هیدراته موجب افزایش pH محیط واکنش (شکل ٤) به بیش از ۱۲ و حل‌شدگی قله‌های کانی‌های رسی کائولینیت، پالی‌گورسکایت و سپیولایت شده است [۱۲]. در واقع تشکیل ساختار مجتمع ذرات خاک (تبادل کاتیونی)، هم‌چنین مصرف ذرات رسی در واکنش‌های پوزولانی (به‌دلیل حلالیت سیلیس و آلومینا در محیط با pH زیاد) و پوشیده شدن آن‌ها به‌وسیله ترکیبات نانوساختار هیدرات سیلیکات کلسیم (C-S-H)، میزان بازتابش پرتو ایکس را کاهش داده که در نهایت شدت قله کانی‌های رسی (پالی-گورسکایت، کائولینیت و سپیولایت) کاهش یافته است.

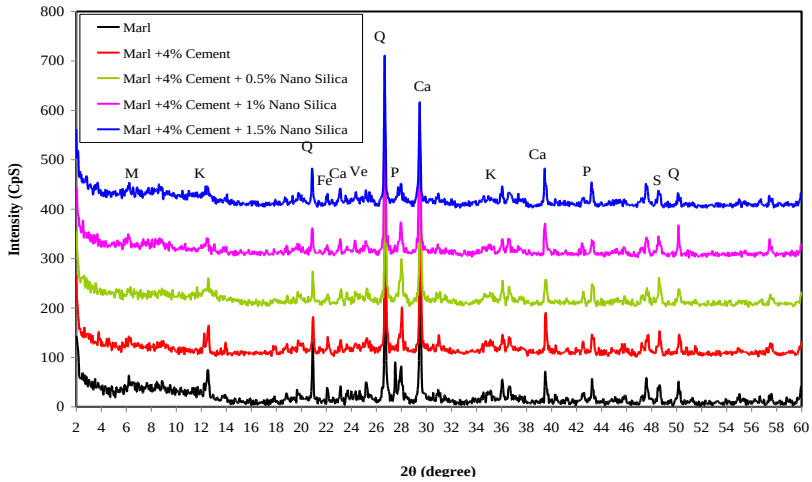
از سوی دیگر الگوهای پراش پرتو ایکس، بازتاب‌های را برای کریستال‌های هیدرات سیلیکات کلسیم (C-S-H) در نمونه‌های اصلاح‌شده با ٤٪ سیمان و درصدهای مختلف نانوسیلیس نشان می‌دهد. این بازتاب‌ها با افزایش سیمان، افزایش نانوسیلیس و زمان عمل‌آوری افزایش داشته است. ترکیبات تشکیل شده شامل نانوساختار هیدرات سیلیکات کلسیم (C-S-H) است [۱٦]، [۲۹]. این مواد معمولاً حفرات خاک را پر کرده و یا این که ذرات آن را می‌پوشانند. در نتیجه تخلخل و نفوذپذیری بسته به درصد سیمان کاهش می‌یابد. آن‌چه باعث افزایش قابل توجه مقاومت در ترکیب خاک و سیمان می‌شود، واکنش پوزولانی

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.1.7.5]

است. با افزودن کافی مقدار سیمان به خاک، pH مخلوط افزایش‌یافته و به بیش از ۱۲ می‌رسد. افزایش pH باعث حل شدن سیلیکات و آلومینات موجود در خاک شده و با آزاد شدن این ترکیب‌ها از خاک رس، ترکیب آن‌ها با کلسیم ممکن می‌شود.

بر اساس نتایج ارائه شده شدت قله اصلی نانو ساختار C-S-H (d_{001}= 3.04 Å) با افزایش درصد نانوذرات نانوسیلیس افزایش یافته است. بر اساس نتایج ارائه شده با افزایش ٤٪ سیمان شدت قله اصلی نانو ساختار C-S-H حدود CpS ۷۸ است، در نمونه اصلاح شده با ٤٪ سیمان و ۰/۵٪ نانوسیلیس شدت قله اصلی نانو ساختار C-S-H تغییر محسوسی نداشته است. در نمونه اصلاح شده با ٤٪ سیمان و ۱٪ نانوسیلیس شدت قله نانو ساختار C-S-H حدود CpS ۱۷٦ است و با افزایش میزان نانوسیلیس به ۱/۵٪ شدت قله اصلی نانو ساختار C-S-H به CpS ۱۲۹ کاهش یافته است. بر این اساس می‌توان پیش‌بینی کرد درصد بهینه نانوسیلیس ۱٪ است. در حقیقت افزودن نانوسیلیس به مخلوط خاک مارن- سیمان منجر به افزایش پایداری نانوساختار هیدرات سیلیکات کلسیم (C-S-H) می‌شود. در این حالت می‌توان نتیجه‌گیری کرد که به‌دلیل توزیع گسترده و یکنواخت C-S-H در سطح ذرات خاک، تخلخل و نفوذپذیری کاهش یافته است



شکل ۵. منحنی پراش اشعهٔ ایکس نمونه رسی مارن و مارن اصلاح شده با ٤٪ سیمان و درصدهای مختلف نانوسیلیس

P: پالی‌گورسکایت، S: سپیولایت، K: کائولینیت، M: مونت‌موریلونیت، ، Ca: کلسیت، Q: کوارتز، C-S-H: هیدرات سیلیکات کلسیم.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.1.7.5]

۳. بررسی مقاومت فشاری محدود نشده در فرایند تثبیت

شکل ٦ روند تغییرات مقاومت فشاری محدود نشده (UCS) نمونه‌های اصلاح شده با سیمان و نانوسیلیس را بعد از ۲۸ روز عمل‌آوری نشان می‌دهد. بر اساس نتایج ارائه شده حضور نانوسیلیس در فقدان سیمان تأثیر چشم‌گیری بر مقاومت فشاری خاک مارنی نداشته است، هرچند که نانوسیلیس می‌تواند نقش پرکنندگی داشته باشد و مقداری مقاومت فشاری را افزایش دهد.

افزایش ۲٪ سیمان مقاومت فشاری خاک مارنی را بیش از ٤/٧ kg/cm^2 افزایش داده است. بر اساس نتایج ارائه شده در شکل ٦ در نمونه حاوی ۲٪ سیمان، افزایش مقاومت فشاری به مقدار ناچیزی وابسته به واکنش‌ها پوزولانی است و عامل اصلی افزایش مقاومت ماهیت کلوخه‌ای شدن خاک اصلاح شده که با واکنش سریع سیمان با خاک رس ایجاد می شود، نسبت داده می‌شود. هم‌چنین بر اساس منحنی پراش پرتو ایکس ارائه شده در شکل ۵ در نمونهٔ اصلاح شده با سیمان، قله‌های بسیار ضعیف نانوساختار هیدرات سیلیکات کلسیم (C-S-H) مشاهده می‌شود. از سوی دیگر افزایش ۰/۵ درصد نانوسیلیس به ۲٪ سیمان مقاومت فشاری را به بیش از ۹ kg/cm^2 رسانده و افزایش ۵۷٪ مقاومت فشاری را نشان می‌دهد. با افزایش نانوسیلیس به ۱/۵ درصد در حضور ۲٪ سیمان مقاومت فشاری خاک مارنی اصلاح شده به حدود ۱۲/۵ kg/cm^2 رسیده است. این افزایش مقاومت را می‌توان به‌دلیل فعل و انفعالات شیمیایی و فیزیکی ذرات نانوسیلیس و سیمان ارزیابی کرد. این افزایش مقاومت و فرایند تثبیت موجب پایداری ساختار خاک مارنی شده است و وارفتگی در خاک حادث نمی‌شود.

در نمونه اصلاح شده با ٤٪ سیمان در فقدان نانوسیلیس مقاومت فشاری نسبت به نمونه مرجع حدود ١٦ برابر افزایش یافته است و به حدود ١٦/٥ kg/cm^2 رسیده است. بر این اساس رفتار مقاومت فشاری محدود نشده (UCS) را می‌توان به تغییرات ساختار ذرات که در اثر واکنش‌های کوتاه‌مدت ایجاد شده‌اند نیز نسبت داد. تبادل کاتیونی به‌وسیلهٔ کلسیم یک ساختار پایدارتر (غیرمتورم) و فشرده‌تر ایجاد می‌کند که به نمونهٔ رسی استحکام بیش‌تری می‌دهد. به‌علاوه تشکیل نانوساختار و هیدرات سیلیکات کلسیم (C-S-H) در این رفتار

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.1.7.5]

نقش تعیین‌کننده داشته است [۱٤]، [۱٦]. در نمونه اصلاح شده با ٤٪ سیمان و ۱٪ نانوسیلیس مقاومت فشاری نسبت به نمونه اصلاح شده با ٤٪ سیمان تقریباً دو برابر افزایش یافته است و به حدود ۳۰/۵ kg/cm2 رسیده است، این افزایش می‌تواند به دلیل افزایش تشکیل نانوساختار C-S-H و همچنین تشکیل ساختار متراکم‌تر باشد. شایان ذکر است بر اساس نتایج آزمایش وارفتگی، خاک مارن اصلاح شده با ٤٪ سیمان و ۱٪ نانوسیلیس هنگامی که در آب قرار می‌گیرد کاملاً پایدار است.

شکل ۷ روند تغییرات مقاومت فشاری محدود نشده نمونه‌های اصلاح شده با درصدهای مختلف سیمان و ۱٪ نانوسیلیس را طی زمان ارائه داده است. روند افزایش مقاومت نمونه‌های اصلاح شده با ۱٪ نانوسیلیس در فقدان سیمان در زمان نشان می‌دهد که حضور نانوسیلیس طی زمان تأثیرگذار نیست. بر اساس نتایج ارائه شده در نمونهٔ اصلاح شده با ۲٪ سیمان و ۱٪ نانوسیلیس مقاومت یک روزه به ٦/۸۹ kg/cm^2 رسیده است، این رفتار را می‌توان به ماهیت کلوخه‌شدن خاک اصلاح شده که با واکنش سریع سیمان و خاک ایجاد شده و تشکیل محدود نانوساختار C-S-H نسبت داد. این در حالی است که پس از ۲۸ روز با ادامه واکنش‌های پوزولانی میزان مقاومت فشاری به ۱۲/۸۵ kg/cm^2 رسیده است. پس از ۲۸ روز فرایند واکنش‌های پوزولانی تقریباً به پایان رسیده است و مقاومت نهایی پس از ۹۰ روز به حدود ۱۳ kg/cm^2 رسیده است. برای مقادیر کم سیمان (۲ و ٤ درصد) که به نمونه خالص اضافه شده است مقاومت فشاری محدود نشده (UCS) در طول ۲۸ روز به مقدار بیشینه رسیده و به‌نظر می‌رسد این مقادیر سیمان به‌طور کامل برای واکنش کوتاه‌مدت استفاده شده است. شایان ذکر است در تمام نمونه‌های اصلاح شده با ۲٪ سیمان و ۱٪ نانوسیلیس نسبت به نمونه اصلاح شده با ۲٪ سیمان مقاومت فشاری بین ۳ kg/cm^2 تا ۷ kg/cm^2 افزایش یافته است. شایان ذکر است نرخ رشد واکنش‌های پوزولانی بعد از ۲۸ روز نمی‌تواند قابل توجه باشد (pH ≤۱۲) و افزایش مقاومت فشاری محدود است. در نمونه اصلاح شده با ۸٪ سیمان و ۱٪ نانوسیلیس مقاومت یک روزه حدود ۱۸/۵ kg/cm^2 است که این افزایش مقاومت پس از ۹۰ روزبه حدود ۵۱ kg/cm^2 رسیده است که مقدار چشم‌گیری است. شایان ذکر است

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.1.7.5]

تمام نمونه‌ها در دوره عمل‌آوری در حمام رطوبت نگه‌داری شده و رطوبت محیط ثابت بوده است، بر این اساس افزایش مقاومت فشاری ناشی از خشک‌شدگی نمونه‌ها نیست.

مقاومت فشاری، با افزایش مقدار (سیمان- نانوسیلیس) روند صعودی دارد که این موضوع را می‌توان به‌دلیل فعل و انفعالات شیمیایی و فیزیکی ذرات نانوسیلیس و سیمان ارزیابی کرد. در واقع مصرف کامل سیمان و توسعه واکنش‌های پوزولانی به‌دلیل حضور نانوسیلیس موجب تقویت پیوند بین ذرات و در نهایت افزایش مقاومت فشاری محدود نشده نمونه‌ها را به همراه داشته است.

چنان‌که در شکل‌های ٦ و ٧ نشان داده شد نانوسیلیس به تنهایی تأثیر چندانی بر مقاومت فشاری محدود نشده خاک مارن ندارد، اما به‌عنوان ذرات فعال زمانی که با ذرات سیمان ترکیب می‌شوند به‌دلیل توسعه واکنش‌های پوزولانی و تشکیل نانوساختار C-S-H مقاومت فشاری نمونه خاک مارن را به میزان چشم‌گیر افزایش می‌دهد. هم‌چنین مقدار کم نانوسیلیس مقاومت خاک تثبیت شده با سیمان را تا حد زیادی افزایش می‌دهد. در حقیقت نانوسیلیس به‌دلیل بالا بودن مساحت سطح مخصوص و واکنش سطحی باعث متراکم شدن نانوساختار هیدرات سیلیکات کلسیم (C-S-H) می‌شود. خاصیت پرکنندگی نانوسیلیس، تخلخل موجود درون ترکیبات سیمانی تشکیل شده را پر می‌کند. به‌طورکلی می‌توان بیان کرد که افزودن نانوسیلیس منجر به بهبود مقاومت فشاری خاک می‌شود.

٤. بررسی ساختار خاک طی فرایند تثبیت

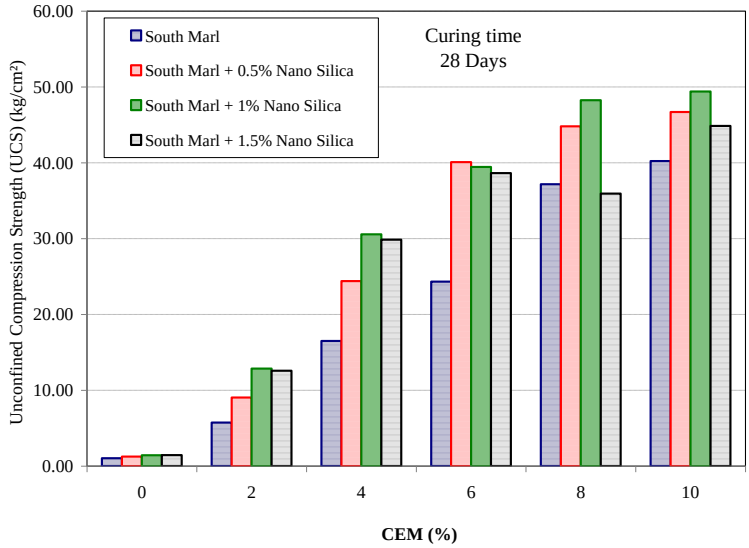
در این بخش تغییر ساختار نمونه خاک مارن و نمونه‌های اصلاح شده با سیمان بررسی شده است. بر اساس تصویر میکروسکوپ الکترونی پویشی (SEM) در شکل ٨ می‌توان ساختار پراکنده خاک مارن را مشاهده کرد. هم‌چنین از اتصال ذرات رس به یک‌دیگر به‌وسیلهٔ آب، ذرات کلوخه‌ای شکل درون ساختار خاک مارنی مشاهده شده است.

از سوی دیگر افزایش ٤٪ سیمان و عمل‌آوری ٢٨ روزه موجب شده که منافذ ساختار به شدت کاهش یابد (شکل ٩). تغییرات بافت خاک مارنی طی فرایند تثبیت با سیمان به‌وسیلهٔ افزایش اندازهٔ ذرات منعکس شده است. به‌طور معمول، مبادله کاتیون و فلوکوله شدن، عمدتاً برای بهبود کوتاه‌مدت خواص ژئوتکنیکی قابل قبول است. در مقابل واکنش‌های پوزولانی که

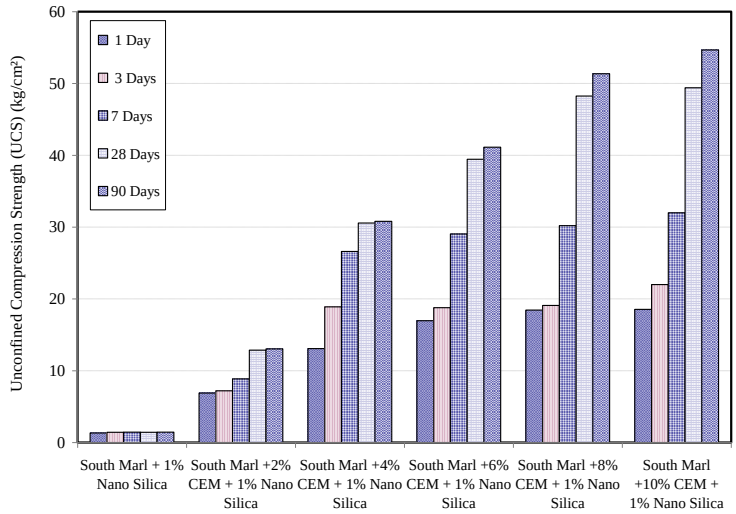
[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.1.7.5]

منجر به تشکیل C-(A)-S-H می‌شوند، فرایندهای آهسته‌ای هستند که به‌طور چشم‌گیری در بهبود کوتاه مدت [۲۷]، [۲۹] تأثیری ندارد و در دراز مدت مؤثر است.



شکل ٦. روند تغییرات مقاومت فشاری محدود نشده (UCS) نمونه‌های اصلاح‌شده با سیمان پس از ۲۸ روز عمل‌آوری



شکل ۷. روند تغییرات مقاومت فشاری محدود نشده (UCS) نمونه‌های اصلاح شده با درصدهای مختلف سیمان و ۱٪ نانوسیلیس در طی زمان

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.1.7.5]

نتایج ارائه شده نشان می‌دهد که اثر فلوکوله شدن فوری باعث افزایش محدودی در اندازهٔ ذرات می‌شود. ترکیبات تشکیل‌شده شامل هیدرات سیلیکات کلسیم (C-S-H) حفره‌های خاک را پر کرده و یا این که ذرات آن را پوشانده‌اند، در نتیجه می‌توان نتیجه‌گیری کرد که تخلخل و نفوذپذیری کاهش یافته است. ارزیابی طیف‌سنجی پاشندگی انرژی[1] (EDS) ارائه شده از نمونه‌های حاوی ٤٪ سیمان پس از ۲۸ روز عمل‌آوری در شکل ۹ ب ارائه شده است. بر اساس نتایج طیف‌سنجی پاشندگی انرژی ارائه شده نسبت Ca/Si= ۰/۲۷ و Ca/(Si+Al)= ۰/۲ در نمونه‌های عمل‌آوری شده ۲۸ روزه است. بر اساس نتایج طیف‌سنجی پاشندگی انرژی (EDS) حصول شرایط لازم برای تشکیل نانو ساختار هیدرات سیلیکات کلسیم (C-S-H) به‌وضوح ایجاد نشده است. هر چند که بر اساس تصاویر میکروسکوپ الکترونی پویشی (SEM) می‌توان تشکیل نانوساختار C-S-H را به‌صورت محدود مشاهده کرد. در شکل ۱۰ ب) تصاویر میکروسکوپ الکترونی پویشی (SEM) و تجزیهٔ طیف‌سنجی پاشندگی انرژی (EDS) نمونه‌های عمل‌آوری شده با ٤٪ سیمان و ۱٪ نانوسیلیس در مدت زمان ۲۸ روز ارائه شده است.

براساس نتایج ارائه شده در شکل ۱۰ تشکیل نانوساختار هیدرات سیلیکات کلسیم (C-S-H) روی خاک مورد نظر و هم‌چنین تغییر ساختار خاک به‌وضوح قابل مشاهده است. ذرات خاک به‌علت واکنش با نانوسیلیس منسجم‌تر شده‌اند. نانوسیلیس‌ها در سطح وسیعی، با ذرات خاک مارن وارد واکنش شده‌اند که علاوه بر بهبود خصوصیات مهندسی خاک، منجر به ایجاد سطح یکنواخت در خاک می‌شود. افزودن نانوسیلیس در ترکیب خاک- سیمان منجر به رشد تشکیل نانوساختار C-S-H شده است. این ترکیبات ایجاد شده ناشی از واکنش‌های صورت گرفته در فرآیند تثبیت، ذرات خاک را پوشش می‌دهد و مقاومت خاک را نیز افزایش می‌دهد. شایان ذکر است نتایج آزمایش پراش اشعه ایکس نیز رشد تشکیل نانوساختار C-S-H را تأیید می‌کرد.

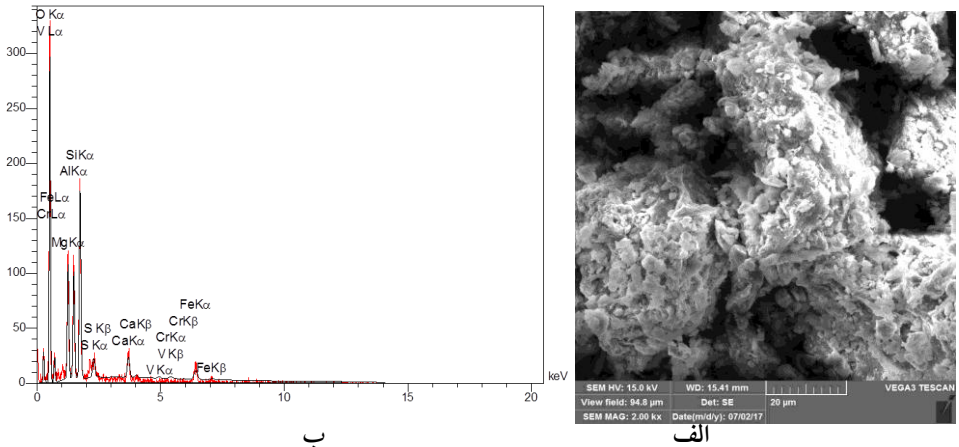
براساس تجزیهٔ طیف‌سنجی پاشندگی انرژی (EDS) در نمونه اصلاح شده با ٤٪ سیمان و ۱٪ نانوسیلیس نسبت Ca/Si= ۱/٦۳ و نسبت Ca/(Si+Al)= ۱/۱۰ بوده است، در حقیقت محیط مناسب برای تشکیل نانوساختار C-S-H ایجاد شده است. چنان‌که مشاهده می‌شود

1. Energy Dispersive Spectroscopy

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

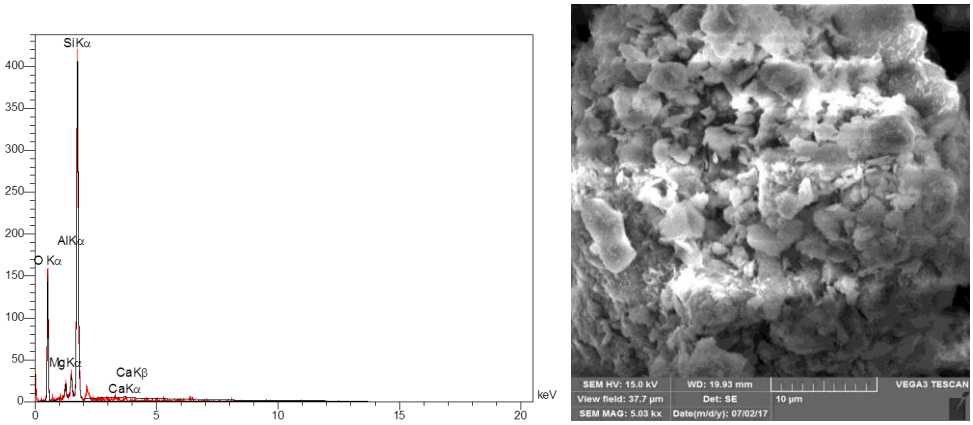
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.1.7.5]

نتایج ارزیابی طیف‌سنجی پاشندگی انرژی (EDS) و تصاویر میکروسکوپ الکترونی پویشی (SEM) نتایج پراش پرتو ایکس ارائه شده در شکل ٦ را تأیید می‌کند. در حقیقت نرخ رشد نانوساختار هیدرات سیلیکات کلسیم (C-S-H) در ارزیابی پراش پرتو ایکس و تصاویر میکروسکوپ الکترونی پویشی (SEM) به‌خوبی افزایش مقاومت فشاری نمونه‌ها در شکل ٧ را تأیید می‌کند.



ب الف

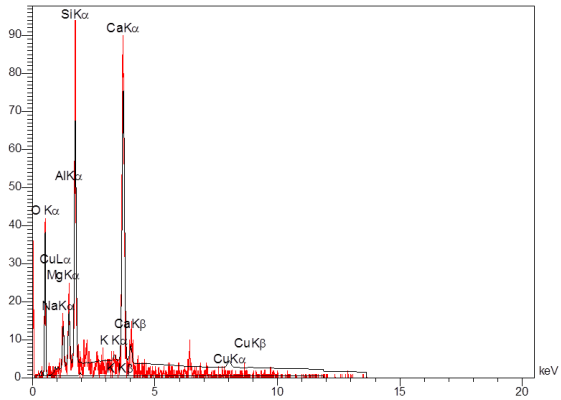
شکل ٨. الف) تصویر میکروسکوپ الکترونی پویشی از خاک مارن، ب) طیف‌سنجی پاشندگی انرژی (EDS) از نمونه مارن



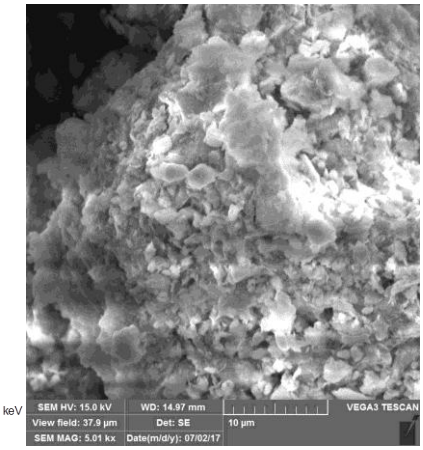
ب الف

شکل ٩. الف). تصویر میکروسکوپ الکترونی پویشی از نمونه خاک مارن تثبیت شده با ٤٪ سیمان پس از ٢٨ روز عمل‌آوری، ب) طیف‌سنجی پاشندگی انرژی (EDS) از نمونه مارن تثبیت شده با ٤٪ سیمان پس از ٢٨ روز عمل‌آوری

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.1.7.5]



ب



الف

شکل ۱۰. الف). تصویر میکروسکوپ الکترونی پویشی از نمونه خاک مارن تثبیت شده با ٤٪ سیمان و ۱٪ نانوسیلیس پس از ۲۸ روز عمل‌آوری، ب) طیف‌سنجی پاشندگی انرژی (EDS) از نمونه مارن تثبیت شده با ٤٪ سیمان و ۱٪ نانوسیلیس پس از ۲۸ روز عمل‌آوری

نتیجه‌گیری

بر اساس پژوهش‌های آزمایشگاهی انجام شده در این پژوهش، این نتایج قابل‌استخراج است:

۱. هرچند که حضور نانوسیلیس موجب کاهش pH محیط واکنش می‌شود، اما به‌طورکلی موجب افزایش مقاومت فشاری و شدت قله نانوساختار C-S-H شده است.

۲. در نمونهٔ اصلاح شده با ٤٪ سیمان و ۱٪ نانوسیلیس، مقاومت فشاری نسبت به نمونهٔ اصلاح شده با ٤٪ سیمان تقریباً دو برابر افزایش یافته است و به حدود kg/cm^2 ۳۰/۵ رسیده است، این افزایش می‌تواند به‌دلیل افزایش تشکیل نانوساختار C-S-H (حدود ۱۷٦ CpS) و هم‌چنین تشکیل ساختار متراکم‌تر باشد. از سوی دیگر افزایش نانوسیلیس به ترکیب خاک مارن و سیمان منجر به پایداری بیش‌تر نانوساختار C-S-H می‌شود.

۳. بر اساس نتایج آزمایش تصاویر میکروسکوپ الکترونی پویشی (SEM) به‌دلیل توزیع گسترده و یکنواخت C-S-H با افزایش درصد نانوسیلیس به‌دلیل اتصال ذرات خاک

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.1.7.5]

به یک‌دیگر، ساختاری بسیار متراکم تشکیل شده و منافذ خاک پر شده است. هم‌چنین افزودن نانوسیلیس به مخلوط خاک مارن–سیمان منجر به افزایش فعالیت‌های پوزولانی و رشد و افزایش پایداری نانوساختارهای هیدرات سیلیکات کلسیم (C-S-H) توزیع یکنواخت این نانوساختارها می‌شود. در این حالت می‌توان نتیجه‌گیری کرد که به‌دلیل توزیع گسترده و یکنواخت C-S-H در سطح ذرات خاک، تخلخل و نفوذپذیری کاهش و مقاومت فشاری افزایش یافته است.

۴. بر اساس تجزیهٔ طیف‌سنجی پاشندگی انرژی (EDS) در نمونه اصلاح شده با ۴٪ سیمان و ۱٪ نانوسیلیس نسبت Ca/Si= ۱/۶۳ و نسبت Ca/(Si+Al)= ۱/۱۰ بوده است و محیط مناسب برای تشکیل نانوساختار C-S-H ایجاد شده است. نتایج ارزیابی طیف‌سنجی پاشندگی انرژی (EDS)، تصاویر میکروسکوپ الکترونی پویشی (SEM) و نتایج پراش پرتو ایکس افزایش مقاومت فشاری نمونه‌ها تثبیت شده را تأیید می‌کند.

قدردانی

از حوزهٔ معاونت پژوهشی دانشگاه هرمزگان برای تهیهٔ بخشی از مواد و وسایل این تحقیق، تشکر می‌کنیم.

منابع

1. Ouhadi V. R., Yong R. N., "The role of clay fractions of marly soils on their post stabilization failure", J. Engineering Geology, 70 (2003) 365-375.
2. Rezaiy H., Khamechian M., "Investigation of position marlston in rock mass enginnering classification system, case study: Doosti Dam", Journal of Engineering Geology, 10 (2) (2016) 3427-3444.
3. Ramezanpour, H., Smaelnejad, L., "Study of relationships between different type of erosion and soil properties of marls in Southern Guilan Province, Iran", The 15th International Congress of ISCO, Budapest, Hungary (2008) (In Persian).

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.1.7.5]

4. Haddad A, Javdanian H, Ebrhimpour F., "Identification and Stabilization of Dispersive Soils: Case Study of Water Transfer Canal of Simindasht-Garmsar", jeg., 11 (1) (2017) 29-50 (In Persian).

5. Elert K., Nieto F., MiguelAzañón J., "Effects of lime treatments on marls", Applied Clay Science, 135 (2017) 611-619.

6. McCarthy D. F., "Essentials of soil mechanics and foundations", 2nd edition, Reston publishing company, Reston, Virginia (1982).

7. Mitchell J. K., "Fundamentals of Soil Behavior", 2nd Edition. John Wiley and Sons, NY (2005).

8. Qawahash A. A., "Geotechnical properties of fine-grained calcareous sediments for engineering purposes", Engineering Geology, 26, (1989) 161-169.

9. Lamas F., Irigaray C., Chacón J., "Geotechnical characterization of carbonate marls for construction of impermeable dam cores", Engineering Geology, 66 (2002) 283-294.

10. Ouhadi V. R., "The role of marl components and ettringite on the stability of stabilized marl", PhD thesis, Department of Civil Engineering and applied mechanics, McGill University, Montreal, Canada (1997).

11. Yong R. N., Ouhadi V. R., "Experimental study on instability of bases on natural and lime/cement- stabilized clayey soils", J. Applied Clay Science, 35 (2007) 238-249.

12. Ouhadi V. R., Yong R. N., Mohamed A. M. O., "Formation of ettringite as a swelling mineral on stabilized marl soil", Proceeding of the 1st conference on civil engineering by Iranian students in Canada, Montreal, (1996) 131-138.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.1.7.5]

13. Behnia K., Ouhadi V. R., Ghalandarzadeh A., "The use of sea-water in stabilization of marly soils with cement and lime", Iranian J. Road Engineering, 26 (1993) 54- 62.
14. Ouhadi V. R., Yong R. N., Amiri M., Ouhadi M. H., "Pozzolanic consolidation of stabilized soft clays", Appl. Clay Sci., 95 (2014) 111-118.
15. Umesha T. S., Dinesh S. V., Sivapullaiah P. V., "Control of dispersivity of soil using lime and cement", International Journal of Geology, 3 (1) (2009) 8-16.
16. Little D. N., "Evaluation of Structural Properties of Lime Stabilized Soils and Aggregates", Summary and findings. Prepared for National Lime Association (1999).
17. Ohadi V. R., Amiri M, Ohadi M., "Micro-Structural Evaluation of Lead Heavy Metal Retention in Stabilization and Solidification with Bentonite and Cement", jeg., 9 (1) (2015) 2575-2592 (In Persian).
18. Gallagher P. M., Lin Y., "Column testing to determine colloidal silica transport mechanisms", Proceedings Sessions of the Geo-Frontiers Congress of Innovations in Grouting and Soil Improvement, Texas, 162 (2005) 1-10.
19. Gallagher P. M., Conlee C. T., Rollins K. M., "Full-Scale Field Testing of Colloidal Silica Grouting for Mitigation of Liquefaction Risk", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 133 (2) (2007) 186-196.
20. Annual Book of ASTM Standards, in: American Society for Testing and Materials, Philadelphia (1992).
21. Hesse P. R., "A textbook of soil chemical analysis", William Clowes and Sons (1971).

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.1.7.5]

22. Ouhadi V. R., Yong R. N., "Experimental and theoretical evaluation of impact of clay microstructure on the quantitative mineral evaluation by XRD analysis", Applied Clay Science, 23 (1) (2003) 141-148.

23. Ouhadi V. R., Amiri M., Zangeneh M., "Microstructural Assessment of Lime Consumption Rate and Pozzolanic Reaction Progress of a Lime-Stabilized Dispersive Soil", Modares Civil Engineering Journal, 16 (1) (2016) 11-22 (In Persian).

24. Ouhadi V. R., Amiri M., Hamidi S., "Dispersive soil improvement with lime, special attention to the reduction of peak intensity of clay minerals in XRD analysis", Modares Civil Engineering Journal, 14(2) (2014) 13-25 (In Persian).

25. Bell F. G., "Lime stabilization of clay minerals and soil", Engineering Geology, 42 (4) (1996) 223-237.

26. Maubec N., Deneele D., Ouvrard G., "Influence of the clay type on the strength evolution of lime treated material", Applied Clay Science, 137 (2017) 107-114.

27. Van Olphen H., "An introduction to clay colloid chemistry", John Wiley, 2nd Edition, New York (1977).

28. Gaucher E. C., Blanc P., "Cement/clay interactions-a review: experiments, natural analogues, and modeling", Waste Management, 26 (7) (2006) 776-788.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.1.7.5]