[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.2.4.1]

[DOI: 10.52547/jeg.15.2.177]

بررسی آزمایشگاهی اثرات سیمان ضد سولفات و ترکیبات باریم بر مقاومت خاک-سیمان در محیط سولفاته

شهام آتش‌بند[۱]، محسن صابر ماهانی*[۲]، حمیدرضا الهی[۳]؛
۱. دانشگاه آزاد اسلامی، اراک، دانشکدهٔ فنی و مهندسی، گروه عمران،
۲. دانشگاه علم و صنعت، دانشکدهٔ فنی و مهندسی، گروه عمران،
۳. دانشگاه علم و فرهنگ، دانشکده فنی و مهندسی، گروه عمران

تاریخ: دریافت ۹۹/۰٤/۲۰ پذیرش ۹۹/۰۷/۱۵

چکیده

در مناطق صنعتی ساحلی، علاوه بر وجود خاک سست اشباع، حمله سولفاتی به المان‌های بهسازی خاک از نوع خاک-سیمان به‌عنوان یک مشکل مضاعف مطرح است. استفاده از سیمان ضد سولفات تیپ پنج به‌عنوان روشی کاهندهٔ اثرات تخریبی مربوط توصیه شده است. با توجه به منابع محدود تولیدکننده این نوع سیمان، اولاً تعیین رابطه بین عیار سیمان مصرفی و مقاومت حاصل در محیط‌های سولفاته از سؤالات مهم مهندسی در این زمینه است و ثانیاً به‌عنوان گزینه‌ای جای‌گزین، استفاده از سیمان تیپ دو که در دسترس‌تر است در ترکیب با افزودنی‌های دیگر موردتوجه قرار می‌گیرد. تحقیق حاضر دو هدف مذکور را با ساخت نمونه‌های استوانه‌ای خاک-سیمان با ماسه، آب و سیمان‌های پرتلند ضد سولفات دنبال می‌کند. سولفات سدیم به‌عنوان سولفات موجود در خاک و آب استفاده شده است. در این تحقیق، اولاً رابطهٔ عیار سیمان تیپ پنج و مقاومت تک‌محوری خاک-سیمان در سولفات ۰٪ تا ۵٪ به‌دست آمده است که نشان می‌دهد عیار ٤۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب به شکل مناسبی افت مقاومت را در سولفات ۲٪ کاهش می‌دهد. ثانیاً، ترکیب سیمان تیپ دو با کلرید و هیدروکسید باریم آزموده شده است. نتایج حاکی از آن است که ترکیب سیمان تیپ دو با کلرید و هیدروکسید باریم، مقاومت‌های بیش‌تری، به‌ترتیب حدود ۲/۷ تا ۳/۳ برابر (در ۳٦۲ روز) نسبت به خاک-سیمان حاوی سیمان تیپ پنج نتیجه می‌دهد؛ هم‌چنین مشاهده می‌شود که افزودنی هیدروکسید باریم در مقایسه با کلرید باریم (با همان نسبت اختلاط) بهتر توانسته است اثرات منفی سولفات بر مقاومت را کاهش دهد.

واژه‌های کلیدی: بهسازی خاک، خاک-سیمان، کلرید و هیدروکسید باریم، سیمان ضد سولفات، مقاومت فشاری تک‌محوری.

*نویسنده مسئول msabermahani@iust.ac.ir

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.2.4.1]
[DOI: 10.52547/jeg.15.2.177]

مقدمه

روش اختلاط خاک یکی از مؤثرترین فنون افزایش توان باربری خاک و کاهش نشست‌پذیری آن است که برای بهسازی محدوده وسیعی از خاک‌های مسئله‌دار با دانه‌بندی‌های مختلف [۱]، [۲] و با کاربردهای متنوع [۳]، [٤] به‌صورت سطحی (SSM)[1] و عمیق (DSM)[2] [۵]، [٦] استفاده می‌شود. در این روش اختلاط خاک با مواد چسبنده از قبیل سیمان و آهک و غیره با روش هم‌زن مکانیکی [۷] و یا تزریق پرفشار [۸] منتج به شکل‌گیری تودهٔ خاک سیمانی و یا المان‌های تثبیت‌شده خاک می‌گردد.

یکی از مشکلات مضاعف در مناطق ساحلی و صنعتی حملات سولفاتی است که المان‌های سازه‌ای و ژئوتکنیکی نظیر پی‌ها، شمع‌ها، ستون‌های اختلاط خاک–سیمان و تزریق پرفشار و غیره را دچار آسیب می‌کند. حملهٔ سولفات‌ها باعث ایجاد ترک‌های پیش‌رونده، انبساط و کاهش قفل و بست بین دانه‌ها و سیمان و هم‌چنین تشکیل اترینگایت و گچ در مخلوط سیمان می‌شود که این تغییرات سبب کاهش مقاومت و حتی تخریب ساختار خاک–سیمان می‌شود [۹]، [۱۰].

منابع و تأثیرات سولفات به دو گروه داخلی و خارجی تقسیم می‌شود [۱۰]. آب، خاک و سیمان منابع داخلی محسوب می‌شوند و عوامل خارجی شامل سولفات‌های طبیعی نظیر کلسیم، منیزیم، سدیم و پتاسیم در آب زیرزمینی و خاک اطراف می‌شود. در این بین سولفات سدیم که محصول فرآیند نمکی است [۱۱] یکی از معمول‌ترین انواع سولفات است که در دریای سیاه و خزر به‌وفور یافت می‌شود و حتی برای مصارف صنعتی استخراج می‌شود [۱۲]. از دیگر منابع سولفات می‌توان به پساب‌های جامد و مایع صنعتی و کشاورزی اشاره کرد [۱۰]. حمله خارجی سولفات بر بتن یک موضوع قدیمی است [۱۰]، [۱۳]. این موضوع بیش از ٦۰ سال است که به‌وسیلهٔ محققان مختلف بررسی شده است [۱٤]، [۱۵] با وجود این هم‌چنان در رابطه با تأثیرات و نحوهٔ عملکرد غیرقابل‌پیش‌بینی آن تحت عوامل مختلف نظیر رطوبت و pH و دما و میزان سولفات و غیره [۱٦]، [۱۷] ابهاماتی وجود دارد [۱۸]؛ اما

1. Shallow soil mixing
2. Deep soil mixing

نکته حائز اهمیت در رابطه با خاک-سیمان، ورود سولفات از همان ابتدا در مخلوط خاک و سیمان و شروع تأثیرات داخلی سولفات از همان لحظات نخست است که وجه تمایز آن با رفتار بتن در معرض سولفات است، به‌عبارتی در تحقیقات معمول روی بتن، مصالح استاندارد ابتدا با یک‌دیگر مخلوط می‌شوند و پس از ۲۸ روز عمل‌آوری در محیط بدون سولفات، در معرض سولفات قرار می‌گیرد که این روند باعث بروز عملکردی متفاوت در اخذ مقاومت نسبت به خاک-سیمان محتوی سولفات می‌شود [۷]. بدین‌سبب برخی از محققان برای بررسی رفتار خاک سیمان از همان ابتدا سولفات را در مخلوط خاک-سیمان وارد کرده‌اند [۱۹]-[۲۳].

از سوی دیگر استفاده از سیمان ضد سولفات پرتلند تیپ پنج یکی از روش‌هایی است که به‌وسیلهٔ آیین‌نامه‌های مختلف در محیط‌های سولفاته توصیه می‌شود [۹]، [۲٤]. محققان متعددی برای بهبود عملکرد سیمان برخی از افزودنی‌ها را بررسی کرده‌اند [۲۵]-[۲۷] و گروهی دیگر از محققان ترکیب آهک و افزودنی را برای تثبیت رس‌ها [۲۸]-[۳۰] و ماسه‌ها [۳۱] آزموده‌اند. آنیتا (۲۰۱٤) نشان داد که با به‌کارگیری کلرید و هیدروکسید باریم در ترکیب با آهک می‌توان اثرات سولفات سدیم را محدود کرد [۲۸]. هم‌چنین لی و همکاران (۲۰۱۷) نشان دادند که هیدروکسید باریم به نحو مؤثری باعث متراکم‌تر شدن ریزساختارهای بتن می‌شود و در نتیجه باعث افزایش مقاومت آن در برابر سولفات می‌شود [۳۲].

در پروژه‌های بهسازی با استفاده از سیمان، عیار سیمان مصرفی یکی از مسائل مهم مهندسی آن پروژه‌ها محسوب می‌شود؛ به‌عبارت‌دیگر همواره در این‌گونه پروژه‌ها این سؤال مطرح می‌شود که در یک محیط با درصد سولفات مشخص، عیار سیمان مصرفی چقدر باید باشد تا از اثرات مخرب سولفات جلوگیری شود و یا این اثرات کاهش یابد. متأسفانه علی‌رغم تحقیقات وسیع انجام شده، تاکنون برای پاسخ به این سؤال، الگو و نمودار پیش طراحی مناسبی ارائه نشده است.

از سوی دیگر با توجه به دسترسی محدود به سیمان تیپ پنج در مقایسه با سیمان تیپ دو و کاربرد فراوان آن در عملیات ساختمانی [۳۳] به‌خصوص در سازه‌های در معرض

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.2.4.1]
[DOI: 10.52547/jeg.15.2.177]

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.2.4.1]

[DOI: 10.52547/jeg.15.2.177]

سولفات [۳٤]، این سؤال مطرح می‌شود که آیا در محیط سولفاته، سیمان تیپ دو در ترکیب با افزودنی‌هایی می‌تواند به‌عنوان جای‌گزینی برای سیمان تیپ پنج استفاده شود؟

بنابراین تحقیق حاضر مشتمل بر دو بخش ذیل پایه‌گذاری شده است:

بخش اول: بررسی تأثیرات تغییر عیار سیمان تیپ پنج بر مقاومت تک‌محوری مخلوط‌های خاک–سیمان در محیط‌های حاوی سولفات سدیم.

بخش دوم: مقایسهٔ میزان تأثیرپذیری مقاومت خاک–سیمان در محیط‌های حاوی سولفات سدیم در دو حالت سیمان تیپ دو در ترکیب با کلرید باریم و هیدروکسید باریم و سیمان تیپ پنج به‌تنهایی .

نمودارهای حاصل از این تحقیق می‌تواند به طراحان در روند پیش طراحی پروژه‌ها کمک نماید به‌طوری‌که برای تثبیت ماسه با استفاده از سیمان، با توجه به درصد سولفات موجود در محیط، عیار مناسب سیمان و درصد افزودنی انتخاب شود.

مصالح و روش آماده‌سازی نمونه‌ها

سیمان

در این تحقیق از دو نوع سیمان پرتلند تیپ ۲–۳۲۵ (که در ایران سیمان فراوان و در دسترسی محسوب می‌شود) و سیمان ضد سولفات تیپ ۵–۳۲۵ استفاده شده است. سیمان‌های مذکور از کارخانه سیمان تهران تهیه شده‌اند که مشخصات شیمیایی این دو نوع سیمان در مقایسه با استاندارد ASTM C150-04 [۳٤] در ۰جدول ۱ مشاهده می‌شود.

خاک

خاک استفاده شده در این تحقیق، از نوع ماسه استاندارد شمارهٔ ۱٦۱ فیروزکوه است. این ماسه دانه‌بندی یکنواختی دارد و طبق طبقه‌بندی متحد [۳۵] از نوع SP[1] (ماسهٔ بد دانه‌بندی شده) است. مقایسه‌ای از منحنی دانه‌بندی ماسه مصرفی بر اساس استاندارد ASTM D421,422 [۳٦]، [۳۷] با ماسه‌های مشابه که در کارهای تحقیقاتی دیگر [۳۸] استفاده شده است در شکل ۱ ارائه شده است و مشخصات آن در جدول ۲ خلاصه شده است. هم‌چنین ترکیبات

1. Poorly graded sand

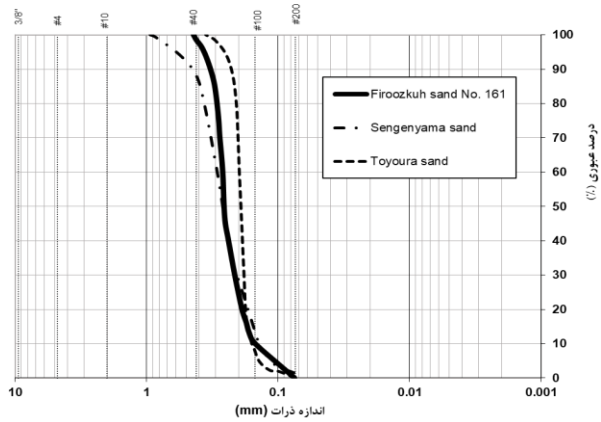
شیمیایی ماسه مذکور در جدول ۳ ارائه شده است. با مقایسه مشخصات فیزیکی و دانه‌بندی ماسه فیروزکوه و ماسه‌های ذکرشده، می‌توان مشاهده کرد که ماسه فیروزکوه از نظر خواص فیزیکی و منحنی دانه‌بندی به ماسه‌های استاندارد Sengenyama و Toyoura شباهت دارد و با دارا بودن ویژگی‌های ثابت، امکان تکرارپذیری آزمایش‌های یکسان و مقایسه نتایج حاصله را فراهم می‌سازد [۳۹]. ماسه فیروزکوه یک ماسه سیلیسی است[۳۹] و به لحاظ کانی شناسی، ۹۰ درصد وزنی آن از جنس فلدسپار و چرت و الباقی آن کوارتز و کلسیت است [۴۰].

جدول ۱. ترکیبات شیمیایی سیمان پرتلند تیپ دو و پنج کارخانه سیمان تهران در مقایسه با استاندارد ASTM C150-4 [۳٤]

محتویات	ترکیب شیمیایی	تیپ دو سیمان (٪) تهران	تیپ دو ASTM حدود استاندارد C150-04 [۳٤] (٪)	تیپ پنج (٪) سیمان تهران	تیپ پنج ASTM حدود استاندارد C150-04 [۳٤] (٪)
Calcium oxide	CaO	٦٥	-	٦٥	-
Iron oxide	Fe_2O_3	٤	٦	٤	-
Aluminum oxide	Al_2O_3	٥	٦	٤	-
Silicon dioxide	SiO_2	٢٠	٢٠	٢٢	-
Magnesium oxide	MgO	٠/٥	٦	٠/١	٦*
Sodium oxide	Na_2O	٠/٣	٠/٦ (Na_2O+0.658K_2O)	٠/٢	٠/٦* (Na_2O+0.658K_2O)
Potassium oxide	K_2O	٠/٦		٠/٤	
Sulphur trioxide	SO_3	٢/١	٣	١/٥	٢/٣*
Loss on ignition	L.O.I	٢	٣	١/٥	٣*
Tricalcium Aluminates	C_3A	٨	٨	٣	٥*
Tetracalcium Aluminoferrite Plus twice the Tricalcium Aluminate	$C_4AF+2(C_3A)$	٣٠	–	١٩	٢٥*
Free CaO		٠/٥	–	-	-

*حد حداکثر

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.2.4.1]
[DOI: 10.52547/jeg.15.2.177]



شکل ۱. نمودار دانه‌بندی ماسه فیروزکوه ۱۶۱ در مقایسه با سایر ماسه‌های تحقیقاتی

جدول ۲. مشخصات فیزیکی ماسه فیروزکوه ۱۶۱ در مقایسه با سایر ماسه‌های تحقیقاتی

اسم ماسه	عبوری از الک ۲۰۰ (٪)	قطر مؤثر D_{10} (mm)	D_{30}(mm)	قطر متوسط D_{50} (mm)	D_{60} (mm)	ضریب یکنواختی Cu	ضریب دانه‌بندی Cc	نسبت تخلخل e_{max}	نسبت تخلخل e_{min}	چگالی ویژه Gs
Firoozkuh 161	۰	۰/۱۵	۰/۲۱	۰/۲۶	۰/۲۷	۱/۸۰	۱/۱۰	۰/۹۳	۰/۵۶	۲/۶۶
Sengenyama [38]	۰/۰۲۳ ۰	۰/۱۵	۰/۲۱	۰/۲۷	۰/۲۸	۲/۱۵	۱/۲۱	۰/۹۱	۰/۶۲	۲/۷۲
Toyoura [38]	۰	۰/۱۵	۰/۱۹	۰/۱۷	۰/۲۰	۱/۵۴	۱/۲۵	۰/۹۸	۰/۶۰	۲/۶۵

جدول ۳. ترکیبات شیمیایی ماسه فیروزکوه ۱۶۱

محتویات	Sulphur trioxide	Potassium oxide	Sodium oxide	Magnesium oxide	Silicon dioxide	Aluminum oxide	Iron oxide	Calcium oxide
ترکیب شیمیایی	SO_3	K_2O	Na_2O	MgO	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO
مقدار (٪)	-	۰/۱۹	-	۰/۲۴	۹۷/۵	۰/۹۵	۰/۸۵	۰/۲۷

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.2.4.1]
[DOI: 10.52547/jeg.15.2.177]

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.2.4.1]

[DOI: 10.52547/jeg.15.2.177]

آب

در این تحقیق از آب شرب[1] تهران استفاده شده است که بدون مقادیر نامتعارف از املاح غیرمجاز در ساخت بتن است.

سولفات

در تحقیق حاضر از سولفات سدیم (Na_2So_4) صنعتی (تناردیت) با درصد خلوص بالا (بیش‌تر از ۹۰٪) استفاده شده است. چگالی این سولفات برابر ($gr./cm^3$) ۲/٦٦ است. در این تحقیق، از این سولفات به‌صورت محلول در آب برای ساخت محیط‌های سولفاته در حوضچه‌های کوچکی از نوع جعبه‌های پلاستیکی استفاده شد. در مخلوط‌های خاک-سیمان نیز از همین سولفات برای شبیه‌سازی سولفات موجود در خاک استفاده شد که میزان سولفات موجود در خاک ۰٪، ۲٪ و ۵٪ انتخاب شد. یادآور می‌شود که مطابق اکثر آیین‌نامه‌ها ازجمله آبا و ACI[2] [۲٤] میزان سولفات ۲٪ به‌عنوان مرز بین محیط خورنده شدید[3] و خیلی شدید[4] تلقی می‌شود. این درصد سولفات در خاک معادل ۱۰،۰۰۰[4](ppm) در آب است [۲٤].

افزودنی‌ها

در این تحقیق به‌عنوان جایگزینی برای سیمان تیپ پنج از سیمان تیپ دو به‌اضافه دو نوع افزودنی کلرید باریم و هیدروکسید باریم استفاده شده است که برخی از مشخصات فیزیکی/شیمیایی آنها به‌ترتیب در جدول ٤ ۰[٤۱]، [٤۲] ارائه شده است.

ایدهٔ اولیه به‌کارگیری این مواد به‌عنوان افزودنی آن است که در آزمایش تعیین میزان سولفات آب و خاک (با روش کدورت‌سنجی[5] با استفاده از دستگاه اسپکتروفوتومتر[6] [٤۳])، از کلرور باریم ۵٪ استفاده می‌شود تا سولفات از مخلوط جداسازی شود. به‌عبارتی مطابق رابطهٔ (۱) [۲۸] باریم باعث رسوب سولفات می‌شود:

$$BaCl_2 + SO_4^{-2} <=> 2Cl^- + BaSO_4 \quad (1)$$

1. Tap water
2. American Concrete Institute
3. Severe
4. Very severe
5. Colorimetric
6. Spectrophotometer

از سوی دیگری تحقیقات متعدد نشان‌دهنده تاثیرات مثبت ترکیبات باریم در محافظت از بتن در برابر سولفات می‌باشند [۲۷]، [۳۰]، [۳۱]، [۳۲].

جدول ٤. برخی مشخصات فیزیکی/ شیمیایی کلرید و هیدروکسید باریم

خصوصیات	واحد	هیدروکسید باریم[٤۲]	کلرید باریم[٤۱]
ترکیب شیمیایی	-	$Ba(OH)_2$	$BaCl_2$
جرم مولی	(g/mol)	۱۷۱/۳٤	۲۰۸/۲۳
چگالی	(g/cm^3)	۳/۷٤	۳/۸٦
دمای جوش	(سانتی‌گراد)	۷۸۰	۱٥٦۰
قابل‌حل در	-	آب	آب
ظاهر	-	جامد سفید	جامد سفید

روش ساخت نمونه‌ها و آزمایش‌ها

برای ساخت نمونه‌های آزمایش فشاری تک‌محوری، مطابق استاندارد ASTM 1632[1] [٤٤] عمل شد. عیار سیمان مصرفی در هر یک از مخلوط‌ها مطابق ۰ است. سولفات سدیم لازم برای هر ترکیب، به‌صورت محلول در آب در مخلوط‌ها استفاده شد.

نام‌گذاری کلی مخلوط نمونه‌ها بدین‌شرح انجام شده است: هر مخلوط با نماد کلی XsYcZ نام‌گذاری شده است که در آن X نوع سیمان مصرفی، Y درصد سولفات محیط و Z عیار سیمان (kg/m^3) است. در بخش دوم تحقیق، در ادامهٔ نام مخلوط از علائم B یا HB استفاده شده است که به‌ترتیب بیان‌گر استفاده از کلرید باریم و هیدروکسید باریم است.

چنان‌که در جدول ٥ مشاهده می‌شود، در بخش اول تحقیق از سیمان تیپ ٥ با عیارهای مختلف در محیط سولفاتی با شدت‌های مختلف استفاده شد. در بخش دوم تحقیق از سیمان تیپ ۲ با عیار (kg/m^3) ۳۰۰ و در حضور ٥٪ سولفات سدیم استفاده شد. هم‌چنین در این بخش تأثیر کلرید و هیدروکسید باریم بر رفتار نمونه‌ها نیز بررسی شد.

1 American Society for Testing and Materials

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.2.4.1]
[DOI: 10.52547/jeg.15.2.177]

جدول ۵. ترکیب مخلوط‌ها در هر یک از بخش‌های تحقیق

نماد مخلوط	درصد سولفات سدیم	افزودنی	نوع سیمان پرتلند	مقدار سیمان		بخش تحقیق
				مقدار سیمان[۹] α_w (Kg/Kg)	عیار سیمان[۹] α (Kg/m^3)	
Vs0c400	٪۰	-	۳۲۵-۵	۰/۲۶	۴۰۰	بخش اول
Vs0c300	٪۰	-	۳۲۵-۵	۰/۱۷	۳۰۰	
Vs0c200	٪۰	-	۳۲۵-۵	۰/۱۰	۲۰۰	
Vs2c400	٪۲	-	۳۲۵-۵	۰/۲۶	۴۰۰	
Vs2c300	٪۲	-	۳۲۵-۵	۰/۱۷	۳۰۰	
Vs2c200	٪۲	-	۳۲۵-۵	۰/۱۰	۲۰۰	
Vs5c400	٪۵	-	۳۲۵-۵	۰/۲۶	۴۰۰	
Vs5c300	٪۵	-	۳۲۵-۵	۰/۱۷	۳۰۰	
Vs5c200	٪۵	-	۳۲۵-۵	۰/۱۰	۲۰۰	
IIs5c300CB	٪۵	$(BaCl_2)$	۳۲۵-۲	۰/۱۷	۳۰۰	بخش دوم
IIs5c300HB	٪۵	$(Ba(OH)_2)$	۳۲۵-۲	۰/۱۷	۳۰۰	

به‌دلیل محدودیت‌های قالب‌های فلزی (افزایش هزینه ساخت و نگه‌داری قالب به تعداد زیاد به‌دلیل آسیب‌پذیری و استهلاک اتصالات و هم‌چنین افزایش انرژی کار برای تمیزکاری قالب‌ها) مطابق توصیه JGC[1] [۴۵] از قالب‌های PVC[2] استفاده شد. به‌منظور بهینه‌سازی حجم مصالح و انرژی مصرفی در آزمایشگاه و با توجه به محدودیت‌های بارگذاری دستگاه آزمایش با در نظر گرفتن قطر ذرات ماسه و با رعایت ضوابط استاندارد JGS [۴۵]، قطر قالب‌های مذکور ۳/۵ سانتی‌متر و نسبت ارتفاع به قطر مطابق با استاندارد ASTM 1632 [۴۴] برابر با ۲ انتخاب شد.

مخلوط‌های خاک-سیمان در سه مرحله داخل قالب ریخته شد و با استفاده از کوبه و هادی مخصوص حباب‌های هوا خارج شد. لازم به ذکر است برای ایجاد پیوستگی در بین لایه‌های خاک-سیمان ریخته شده در قالب و جلوگیری از جدایی آن‌ها در حین خارج‌سازی نمونه از قالب و در حین انجام آزمایش بارگذاری، پس از کوبش هر لایه، سطح آن خراشیده و سپس لایه بعدی ریخته می‌شد.

1. Japanese Geotechnical Society
2. Polyvinyl chloride

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.2.4.1]
[DOI: 10.52547/jeg.15.2.177]

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.2.4.1]
[DOI: 10.52547/jeg.15.2.177]

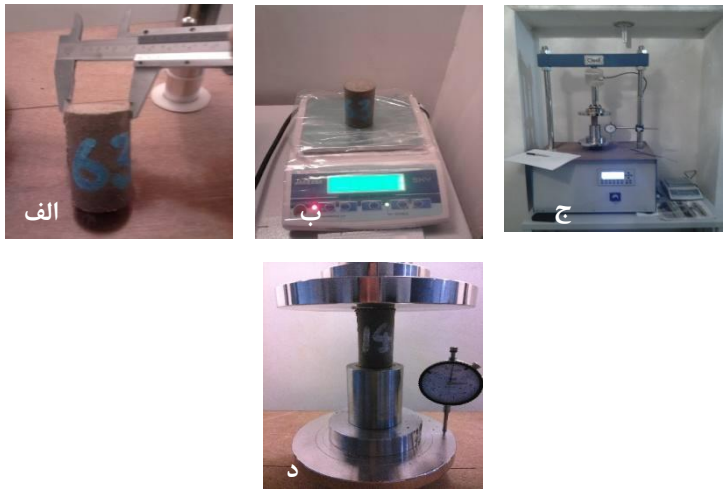
پس از ساخت و قالب‌گیری، به‌منظور تأمین مقاومت اولیه، نمونه‌ها به‌مدت حدود ۳ ساعت در داخل قالب و برای حفظ رطوبت در داخل جعبه‌ای درب بسته (با نایلون) مطابق JGS [٤٥] نگه‌داری شدند. سپس نمونه‌ها با قالب درون محلول سولفات با غلظت متناسب با درصد سولفات موجود در همان نمونه برای مدت ۲٤ ساعت قرار گرفتند. پس از ۲٤ ساعت نمونه‌ها قابلیت خارج‌سازی از قالب را داشتند و نمونه‌های یک‌روزه شکسته شدند و مابقی برای عمل‌آوری تا زمان آزمایش، درون محلول قرار داده شدند. لازم به ذکر است برای کاهش خطا، در هر یک از سنین، سه نمونه با مشخصات یکسان آزمایش شد تا با میانگین‌گیری و تحلیل‌های آماری عدد منطقی انتخاب شود.

به‌منظور تعیین و مقایسه مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه‌ها (q_u)، از آزمایش تک‌محوری فشاری (UCS)[1] مطابق با استاندارد ASTM 1633 [٤٦] استفاده شد (شکل ۲) که نتایج به‌دست‌آمده برای هر نمونه در بخش آینده ارائه شده است. لازم به ذکر است با توجه به مقاومت بینابینی که نمونه‌های خاک-سیمان نسبت به بتن و خاک دارند بدیهی است که دستگاه موردنیاز برای آزمایش تک‌محوری نیز باید اختصاصاً برای این منظور طراحی می‌شد. از این‌رو، جکی با توان بارگذاری مجاز (N) ۲٦۰۰۰ و دقت اندازه‌گیری (N) ۱ برای نیرو و سرعت بارگذاری قابل تنظیم (cm/min) ۵-۰/۰۱ ساخته و استفاده شد.

هم‌چنین برای مشاهده و مقایسه ریزساختارها، تعدادی عکس میکروسکوپی SEM گرفته شد که نتایج و عکس‌ها در بخش آینده ارائه شده است. به‌منظور انجام آزمایش SEM از دستگاه VEGA II LSH TESCAN با قدرت بزرگ‌نمایی تا ۱،۰۰۰،۰۰۰ برابر و رزولوشن(mm) ۳ در (kV) ۳۰ استفاده شد.

برای آماده‌سازی نمونه‌ها جهت عکس‌برداری، ابتدا نمونه‌های مکعبی با ابعاد حداکثر ۱ سانتی‌متر از نمونه‌های اصلی اخذ شد و پس از شماره‌گذاری و خشک کردن و ایجاد خلأ در دستگاه اون خلأ روی پایه مخصوص ثابت شده و طلا پوش شدند و در نهایت در مقابل تفنگ الکترونی قرار داده شدند (شکل ۳).

1. Unconfined compressive strength



شکل ۲. تصاویری از نحوهٔ آماده‌سازی و انجام آزمایش فشاری تک‌محوری: الف) اندازه‌گیری ابعاد اولیه نمونه، ب) اندازه‌گیری جرم نمونه، ج) جک تک‌محوری مخصوص، د) نمونه در بین فک‌های جک



شکل ۳. تصاویری از نحوهٔ آماده‌سازی و انجام عکس‌برداری میکروسکوپی SEM: الف) پوشش طلا، ب) اون خلأ، ج) تفنگ الکترونی و نمایش‌گر تصاویر

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.2.4.1]
[DOI: 10.52547/jeg.15.2.177]

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.2.4.1]
[DOI: 10.52547/jeg.15.2.177]

نتایج آزمایش‌ها

۱. نتایج آزمایش‌های تک‌محوری فشاری (UCS)

مقادیر مقاومت فشاری تک‌محوری به‌دست‌آمده در سنین مختلف (۱، ۳، ۷، ۲۸، ٤۲، ٦۳، ۹۱ و ۳٦۲ روز) برای مخلوط‌های مختلف برحسب کیلوگرم بر سانتی‌مترمربع (kg/cm^2) در ۰جدول ٦ ارائه شده است. در مخلوط Vs5c200 با کم‌ترین عیار سیمان یعنی (kg/m^3) ۲۰۰ و بیش‌ترین مقدار سولفات یعنی ۵٪، مطابق ۰شکل ٤ مشاهده می‌شود که در برخی سنین مقاومت نمونه آن‌قدر کم است که نمونه حتی قبل از بارگذاری با جک گسیخته شده است.

۱-۱. تغییرات مقاومت تک‌محوری با عیار سیمان ضد سولفات تیپ پنج

در بخش اول این تحقیق، رفتار نمونه‌های خاک-سیمان که با عیارهای مختلف سیمان ضد سولفات تیپ پنج ((kg/m^3) ۲۰۰، ۳۰۰ و ٤۰۰) ساخته شده‌اند با تغییر در درصد سولفات موجود در مخلوط آن‌ها (۰٪، ۲٪ و ٪۵) و محیط مربوطه مقایسه می‌شود.

جدول ٦. خلاصه نتایج مقاومت فشاری تک‌محوری (q_u (kg/cm^2) در دو بخش تحقیق

بخش تحقیق	نماد مخلوط	سن (روز)							
		۱	۳	۷	۲۸	٤۲	٦۳	۹۱	۳٦۲
بخش اول	Vs0c400	۱۷/٦٦	۲۷/٤٤	۳۵/۱۹	۵٤/۲۵	۵۹/۱٦	٦۳/۷۲	٦۸/۵۸	۷۹/۵۸
	Vs0c300	۸/٤۹	۱٤/۹۹	۱۹/۹۳	۳۰/۸۳	۳۳/۳۷	۳٦/۰۷	۳۹/۱۱	٤٤/۵۸
	Vs0c200	۳/۳۲	٦/۰۸	۸/۱۸	۱۲/۵۸	۱۳/۵٦	۱٤/٦۸	۱۵/۹٤	۱۸/۰٤
	Vs2c400	۱۵/۷۳	۲٤/۲۵	۳۰/۷۲	٤٦/۲۵	٤۹/۸۳	۵۳/٤٦	۵۷/۸٦	۵۹/۱٦
	Vs2c300	٦/۸۱	۱۱/٦۲	۱۵/۱۰	۲۲/۳۰	۲٤/۰۳	۲۵/۵۲	۲۵/۲۷	۲٤,۱٦
	Vs2c200	۱/۹٤	۳/۲۱	٤/۰۷	۵/۸۸	٦/۲۳	۵/۹۵	۵/۵۸	٤/۹۸
	Vs5c400	۱۰/٤۰	۱٦/۰۳	۲۰/۳۰	۲۹/۷۹	۳۱/۹٦	۳٤/۱۲	۳٤/۹٦	۳۲/۸٤
	Vs5c300	٤/٤٤	۷/٤۳	۹/۵۱	۱۳/۵٦	۱٤/۰۷	۱۳/٤۵	۱۳/۰۲	۱۱/۹۳
	Vs5c200	*	*	*	۱/٤۳	۱/۲۳	۱/۰٦	*	*
بخش دوم	IIs5c300CB	۸/۳٤	۱٤/۵٤	۱۹/۳۵	۲۷/٦۰	۲۹/۰٦	۳۰/۵٤	۳۱/٦۰	۳۱/۷۵
	IIs5c300HB	۱۰/۷۲	۱۷/۹۳	۲۲/۹۵	۳۲/۷۳	۳۵/۰۷	۳٦/۸۰	۳۷/۷۱	٤۰/۳۰

*** این نمونه‌ها به‌دلیل مقاومت ناچیزشان قبل از بارگذاری با جک گسیخته شدند (۰شکل ٤).**

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.2.4.1]
[DOI: 10.52547/jeg.15.2.177]



شکل ٤. تغییر شکل و گسیختگی برخی نمونه‌ها قبل از بارگذاری با جک به‌دلیل مقاومت ناچیز

چنان‌که در ۰شکل ۵ الف و ب و ج مشاهده می‌شود، در نمونه‌های کنترل (سولفات صفر) با افزایش سن، مقاومت فشاری تک‌محوری (q_u) زیاد می‌شود که روند افزایش مقاومت نسبت به زمان از یک رفتار لگاریتمی مطابق رابطهٔ (۲) تبعیت می‌کند.

$$q_u = a.Ln(t)+b \quad (۲)$$

که در آن مقادیر ضرایب a و b مطابق نمودارهای ۰شکل ٦ قابل پیش‌بینی است.

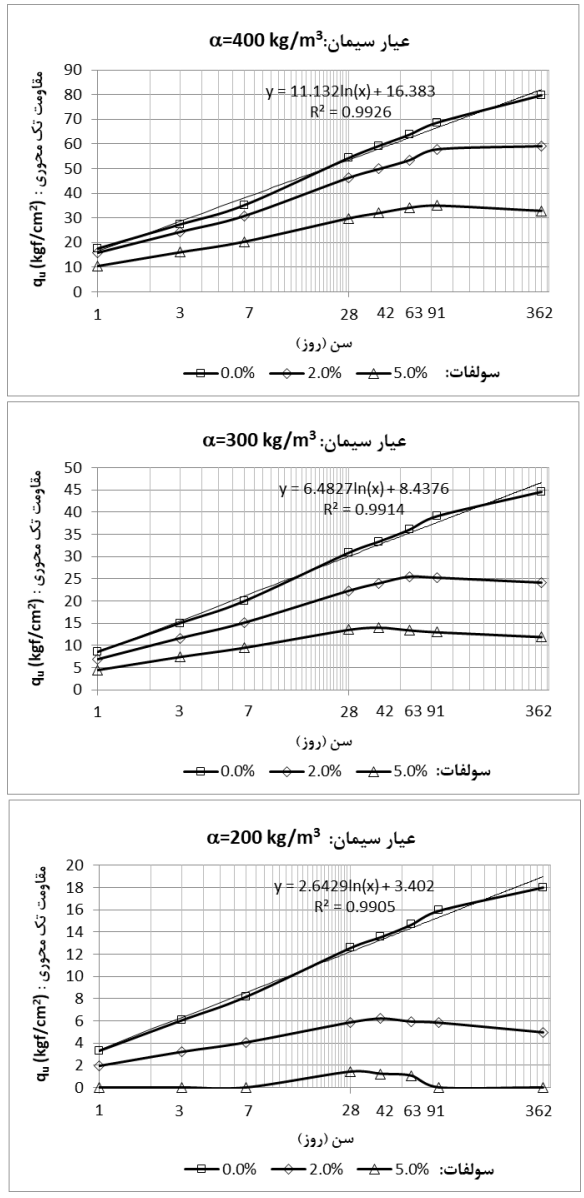
در گروه‌های دیگر با سولفات ۲٪ و ۵٪ (۰شکل ۵) نیز روند کسب مقاومت تا سن مشخصی افزایشی و بعدازآن کاهشی است که در ادامه توضیحات مربوط ارائه می‌شود.

چنان‌چه نسبت مقاومت در هر سن به مقاومت ۲۸ روز در نمونه‌های کنترل محاسبه شود که آیین‌نامه FHWA[1] [۹] به آن f_c اطلاق می‌کند $(f_c=q_u,t/q_u,28)$، ۰برای سولفات ۰٪ حاصل می‌شود.

چنان‌که مشاهده می‌شود برای هر سه میزان سیمان (kg/m^3) ۲۰۰، (kg/m^3) ۳۰۰ و (kg/m^3) ٤۰۰ تقریباً رابطهٔ لگاریتمی (۳) حاکم است:

1. Federal Highway Administration

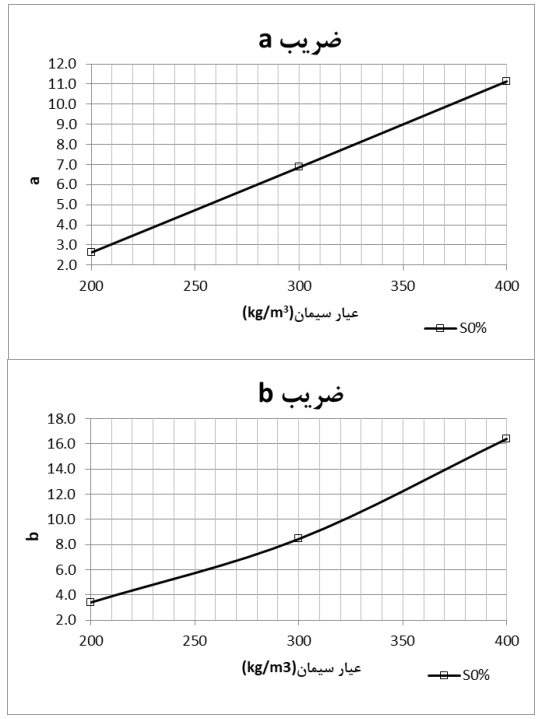
$$f_c = 0.2Ln(t) + 0.3 \quad (۳)$$



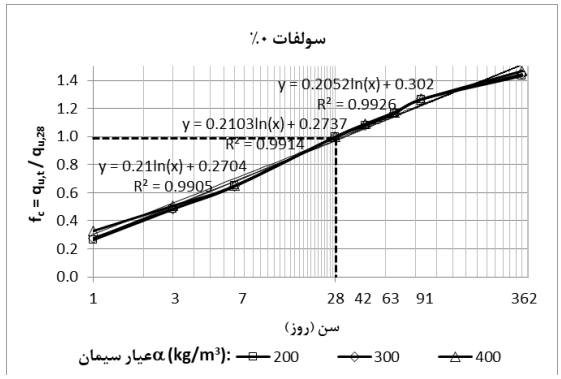
شکل ۵. تأثیر تغییر عیار سیمان ضد سولفات تیپ ۵ و درصد سولفات سدیم بر مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه‌ها با عیار سیمان الف) (kg/m^3)۴۰۰، ب) (kg/m^3)۳۰۰، ج) (kg/m^3)۲۰۰

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.2.4.1]
[DOI: 10.52547/jeg.15.2.177]

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.2.4.1]
[DOI: 10.52547/jeg.15.2.177]



شکل ٦. تغییرات مقدار ضرایب a و b (برای محاسبه مقاومت فشاری تک‌محوری، q_u) با تغییر عیار سیمان الف) (٤٠٠kg/m^3، ب) (٣٠٠kg/m^3، ج) (٢٠٠kg/m^3 برای نمونه‌های کنترل (سولفات صفر)



شکل ۷. تغییرات مقدار پارامتر f_c در سنین مختلف به‌ازای عیارهای مختلف سیمان ((٢٠٠kg/m^3)، (٣٠٠kg/m^3) و (٤٠٠kg/m^3) برای نمونه‌های کنترل (سولفات صفر)

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.2.4.1]
[DOI: 10.52547/jeg.15.2.177]

این رابطه مشابهت زیادی به رابطهٔ پیشنهادی در FHWA [۹] ($f_c = 0.187Ln(t)+0.375$) دارد؛ بنابراین با توجه به مشابهت به‌دست‌آمده در این بخش از نتایج، صحت روند آزمایش کنترل شد.

چنان‌چه در شکل ۵ (الف و ب و ج) مشاهده شد، در سولفات ۲٪ و ۵٪، روند کسب مقاومت متناسب با عیار سیمان تا سنین مشخصی افزایشی است و پس‌ازآن کاهش می‌یابد.

میزان کاهش مقاومت فشاری[1] [۲۵]، [۳۱] نسبت به نمونه‌های کنترل (سولفات ۰٪) با پارامتر CSL مطابق رابطهٔ (٤) محاسبه می‌شود.

$$CSL = \left[\frac{A-B}{A}\right]\times 100 \quad (٤)$$

که در آن:

A: مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه‌های کنترل (سولفات ۰٪)

B: مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه‌های ارزیابی شده (سولفات ۲٪ و ۵٪)

در شکل ۸ (الف، ب و ج) مشاهده می‌شود که تغییرات CSL در زمان از رابطهٔ لگاریتمی (۵) پیروی می‌کند:

$$CSL = a'Ln(t)+b' \quad (۵)$$

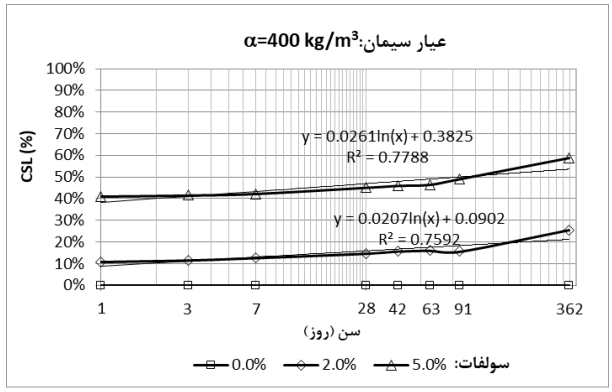
که مقادیر ضرایب a’ و b’ به‌دست‌آمده از معادلات ۰شکل ۷ برای محاسبه CSL در ۰شکل ۹ ارائه شده است.

برای سولفات ۲٪ و ۵٪ نیز مقدار f_c قابل‌محاسبه است (شکل ۱۰). نکته قابل‌توجه در نمودارهای مذکور آن است که افزایش میزان عیار سیمان ضد سولفات نقش تعیین‌کننده‌ای در میزان محدودسازی اثرات حمله سولفاتی دارد؛ به‌عنوان دو شاهد این پدیده در نمودار مذکور می‌توان اولاً به زمان (سن) خروج از روند لگاریتمی در هر سه منحنی ($۲۰۰(kg/m^3)$، $۳۰۰(kg/m^3)$ و $٤۰۰(kg/m^3)$) اشاره کرد که در مورد سیمان با عیار بیش‌تر سن مذکور بیش‌تر است و نقطه عطف دیرتر اتفاق می‌افتد که خود بیان‌گر اثر مقابله سیمان ضد سولفات در مدت زمان بیش‌تر است و ثانیاً مشاهده می‌شود که شیب منحنی f_c بعد از خروج از روند

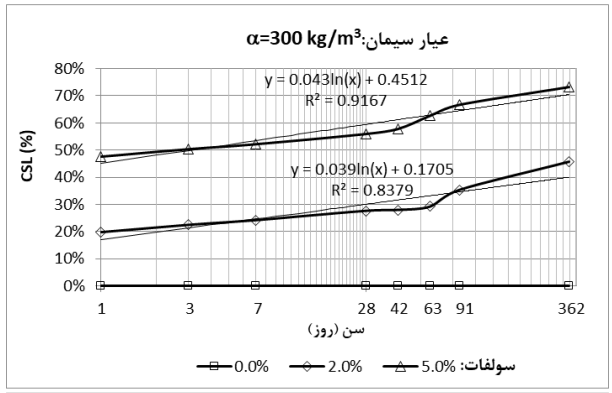
1. Compressive strength loss

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.2.4.1]
[DOI: 10.52547/jeg.15.2.177]

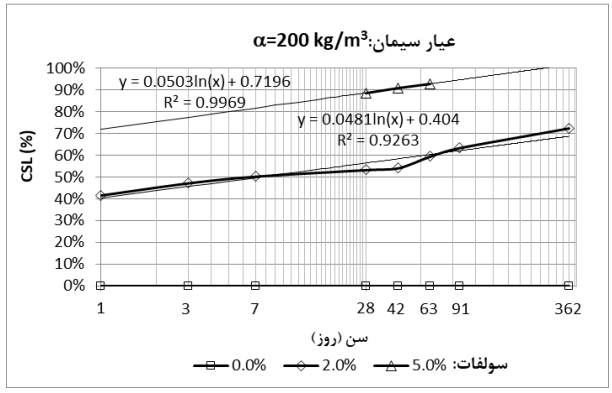
الف



ب

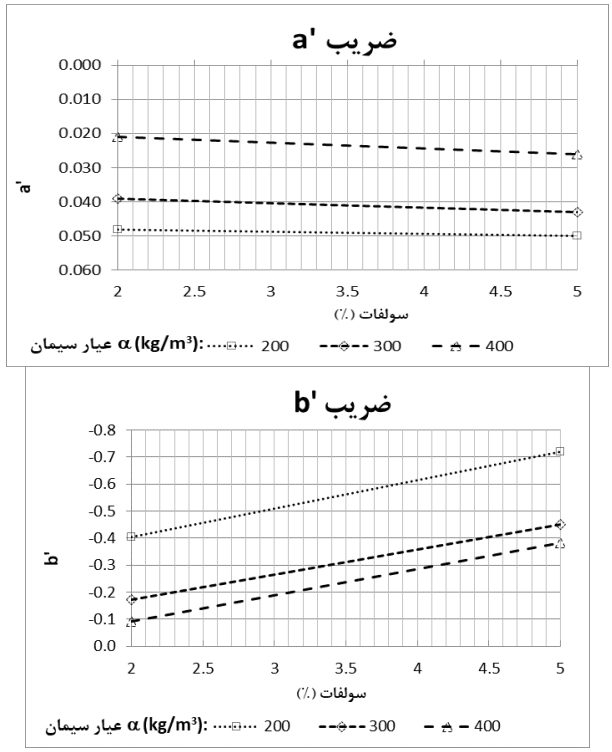


ج



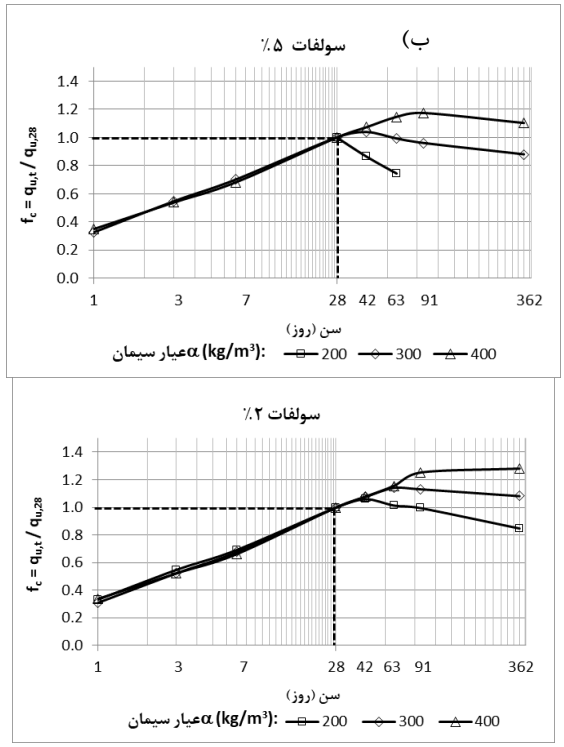
شکل ۸. تأثیر تغییر عیار سیمان و درصد سولفات بر پارامتر *CSL* برای نمونه‌های با سولفات ۲٪ و ۵٪ در الف) عیار (kg/m^3) ۴۰۰، ب) عیار (kg/m^3) ۳۰۰، ج) عیار (kg/m^3) ۲۰۰

لگاریتمی، در عیارهای بالای سیمان و سولفات کم‌تر، کندتر می‌شود به‌طوری‌که در عیار ٤۰۰ (kg/m^3) (علی‌الخصوص در سولفات ۲٪) شیب مذکور رو به صفر شدن می‌نهد (شکل ۱۰ ب).



شکل ۹. تغییرات مقدار ضرایب a' و b' (برای محاسبه CSL) با تغییر عیار سیمان (۲۰۰(kg/m^3)، ۳۰۰(kg/m^3)، ٤۰۰(kg/m^3)) برای نمونه‌های با سولفات ۲٪ و ۵٪

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.2.4.1]
[DOI: 10.52547/jeg.15.2.177]



شکل ۱۰. تغییرات مقدار پارامتر f_c در سنین مختلف به‌ازای عیارهای مختلف سیمان (۲۰۰(kg/m^3)، ۳۰۰(kg/m^3) و ۴۰۰(kg/m^3)) در سولفات الف) ۵٪ و ب) ۲٪

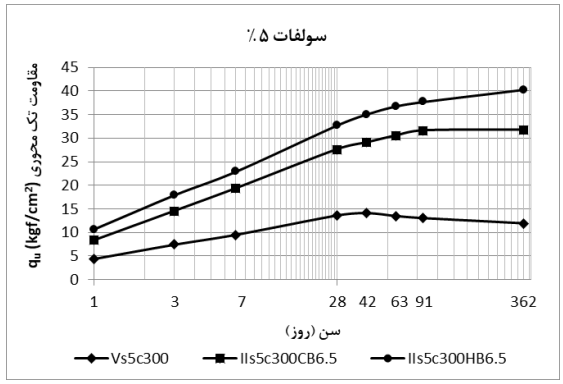
در بخش دوم این تحقیق، نمونه‌هایی که با استفاده از سیمان تیپ دو ساخته شده‌اند مورد آزمایش قرار گرفته است. به‌منظور دست‌یابی به مقاومت مناسب و شرایط پایایی بهتر در معرض سولفات سدیم از کلرید باریم و هیدروکسید باریم به‌عنوان دو افزودنی در ترکیب با سیمان تیپ دو با نسبت ۰٪/۶۵ استفاده شده است. در شکل ۱۱ تغییرات مقاومت فشاری تک‌محوری در مقابل زمان عمل‌آوری و نگه‌داری برای نمونه‌های مذکور ارائه شده است. به‌منظور مقایسه با نتایج سیمان تیپ ۵ که در بخش قبل ارائه شد،

منحنی تغییرات مقاومت-زمان برای سیمان تیپ ۵ با عیار ۳۰۰(kg/m^3) نیز در شکل ۰۱۱ ارائه شده است. بنابراین در شکل مذکور سه منحنی ذیل ارائه شده است:

- خاک-سیمان سولفاته (۵٪) با سیمان تیپ ۵ و عیار ۳۰۰ (kg/m^3)،
- خاک-سیمان سولفاته (۵٪) با سیمان تیپ ۲ و عیار ۳۰۰ (kg/m^3) + کلرید باریم،

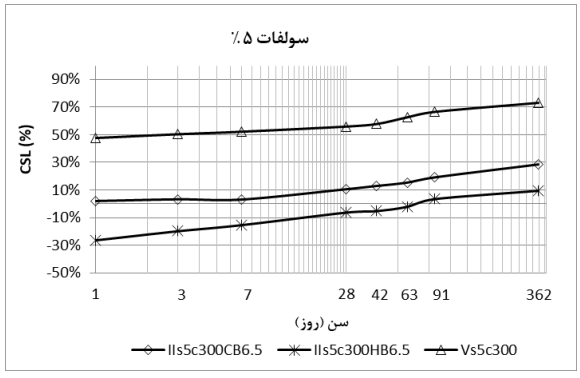
[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.2.4.1]
[DOI: 10.52547/jeg.15.2.177]

- خاک-سیمان سولفاته (۵٪) با سیمان تیپ ۲ و عیار (kg/m^3) ۳۰۰ + هیدروکسید باریم.



شکل ۱۱. تغییرات مقاومت فشاری تک‌محوری در مقابل زمان برای سیمان تیپ ۵ و سیمان تیپ دو در ترکیب با کلرید باریم و هیدروکسید باریم در شرایط سولفات ۵٪

همانند بخش قبل، برای ارزیابی میزان اثرپذیری، از پارامتر CSL استفاده شده است. یادآور می‌شود CSL درصد اختلاف مقاومت در هر سن از گروه مورد نظر نسبت به مقاومت نمونه‌های کنترل (سیمان تیپ پنج با عیار (kg/m^3) ۳۰۰ و بدون سولفات، Vs0c300) در همان سن است. تغییرات CSL نسبت به زمان برای سه گروه فوق‌الذکر در شکل ۱۲ ارائه شده است.



شکل ۱۲. تغییرات CSL مقاومت فشاری تک‌محوری در مقابل زمان برای سیمان تیپ ۵ و سیمان تیپ دو با عیار (kg/m^3) ۳۰۰ در ترکیب با کلرید باریم و هیدروکسید باریم در شرایط سولفات ۵٪

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.2.4.1]
[DOI: 10.52547/jeg.15.2.177]

چنان‌که در شکل‌های فوق مشاهده می‌شود، ترکیب خاک با افزودنی‌های باریم، مقاومت فشاری بیش‌تری (حدود ۲/۷ تا ۳/۳ برابر در ۳۶۲ روز) نسبت به خاک-سیمان حاوی سیمان تیپ پنج نتیجه داده است.

چنان‌که از تحقیقات مشابه بتن در مجاورت سولفات [۳۱] نتیجه شده است، هیدروکسید باریم می‌تواند به نحو مؤثری از کاهش مقاومت فشاری در برابر سولفات جلوگیری کند. به‌طوری‌که در تحقیق حاضر نیز مشاهده می‌شود که افزودنی هیدروکسید باریم در مقایسه با کلرید باریم (با همان نسبت اختلاط) بهتر توانسته است عملکرد سولفات را کنترل کند، به‌طوری‌که در ۳۶۲ روز مقدار CSL به زیر ۱۰٪ محدود شده است حال‌آن‌که در کلرید باریم این مقدار در حدود ۳۰٪ است و روند کاهش مقاومت در آن هم‌چنان پیش‌رونده است.

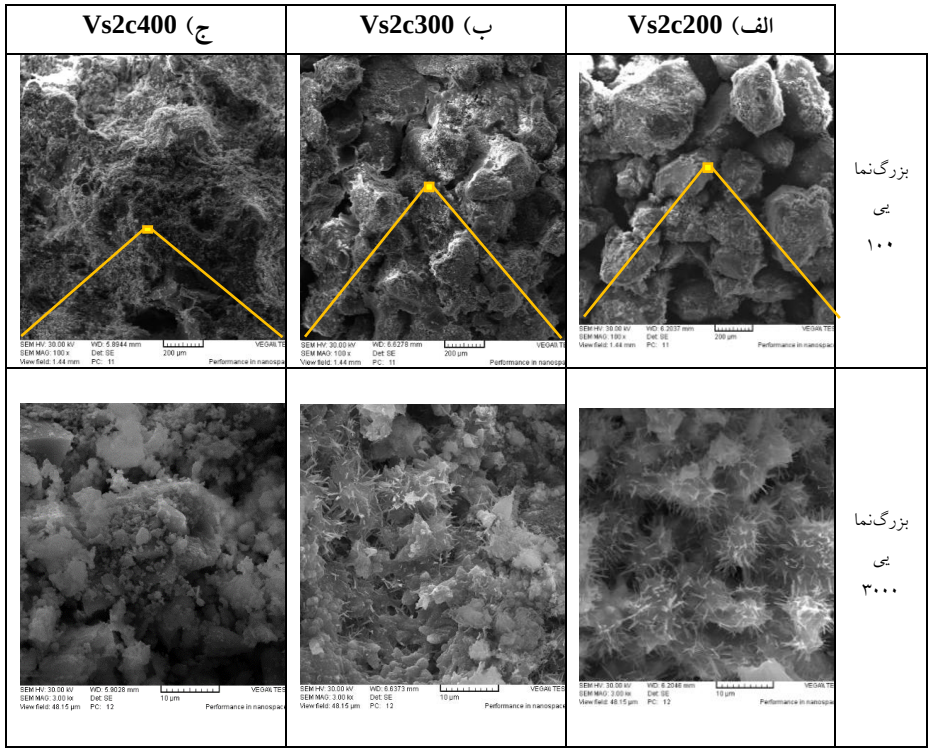
نکته حائز اهمیت دیگر که از نمودارهای ارائه شده قابل‌استخراج است آن‌که هیدروکسید باریم تا ۹۱ روز مقاومت‌هایی بزرگ‌تر از ترکیب خاک-سیمان حاوی (kg/m^3) ۳۰۰ سیمان تیپ پنج و فاقد سولفات (نمونه‌های کنترل) نتیجه داده است.

با توجه به اختلاف عمده تحقیقات خاک-سیمان و بتن که اغلب در سنین کم قابل توجه است، مؤلفان در این تحقیق سعی کردند که با کاهش فواصل زمانی مورد آزمایش تا ۳۶۲ روز (۲۸،۴۲،۶۳،۹۱،۱،۳،۷ روز) و افزایش نمونه‌های هم سن، دقت تعیین روند تغییرات پارامتر مقاومت فشاری تک محوری را در این بازه زمانی افزایش دهند و هم‌چنین با رعایت شرایط ساخت نمونه در آزمایشگاه کیفیت نمونه‌ها را افزایش داده به‌نحوی که پراکندگی نتایج به‌دست آمده از نمونه‌های هم سن و هم گروه ناچیز شد. با این وجود هرچند روند تغییرات بعد از ۳۶۲ روز تاحدودی با توجه به منحنی های به‌دست آمده قابل پیش‌بینی است، لیکن پیشنهاد می‌شود در صورت نیاز به تدقیق نتایج، در ادامه، تحقیقات وسیع‌تری با بازه زمانی طولانی‌تر انجام شود.

عکس‌های میکروسکوپی (SEM)

عکس‌هایی که با بزرگ‌نمایی ۱۰۰ و ۳۰۰۰ از نمونه‌های دارای (kg/m^3)۲۰۰، (kg/m^3)۳۰۰ و (kg/m^3)۴۰۰ سیمان ضد سولفات تیپ پنج در سن ۳۶۲ روز در معرض سولفات تهیه شده، در شکل ۱۳ ارائه شده است.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.2.4.1]
[DOI: 10.52547/jeg.15.2.177]



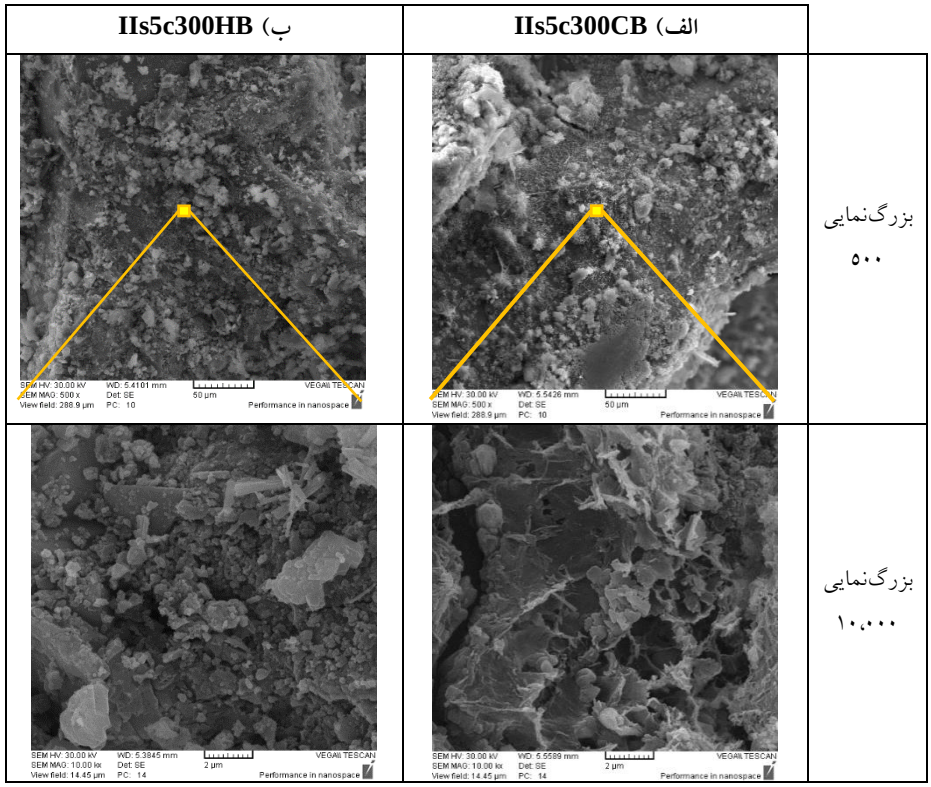
شکل ۱۳. عکس‌های SEM، تغییرات مورفولوژی ریزساختارها که در سولفات ۲٪ ایجاد شده است به‌ازای عیارهای مختلف سیمان تیپ پنج الف)(kg/m^3) ۲۰۰، ب)(kg/m^3) ۳۰۰، ج) (kg/m^3) ۴۰۰ ؛ بالا: بزرگ‌نمایی ۱۰۰ و پایین: بزرگ‌نمایی ۳۰۰۰

چنان‌که در عکس‌های با بزرگ‌نمایی ۱۰۰ مشاهده می‌شود، با افزایش مقدار سیمان، خلل و فرج نمونه کم‌تر شده است و محصولات سیمانی بیش‌تری دانه‌ها را در بر گرفته است. در بزرگ‌نمایی ۳۰۰۰ نیز مشاهده می‌شود که هرچه میزان سیمان ضد سولفات بیش‌تری در نمونه به‌کار برده شده است، محصولات تخریبی کم‌تری شکل گرفته است و خلل و فرج به‌وسیلهٔ محصولات هیدراتاسیون سیمان پر شده است [۴۷]، و با ایجاد جسمی توپر مقاومت مجموعه در مقابل سولفات افزایش یافته است.

در ۰شکل ۱۴ عکس‌های SEM مربوط به ترکیبات سیمان تیپ دو (عیار (kg/m^3) ۳۰۰) با دو افزودنی کلرید و هیدروکسید باریم در معرض سولفات سدیم (۵٪) تا سن ۳۶۲

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.2.4.1]
[DOI: 10.52547/jeg.15.2.177]

روز ارائه شده است. چنان‌که در عکس‌های با بزرگ‌نمایی ۱۰۰ و ۳۰۰۰ مشاهده می‌شود، تغییر مورفولوژی در مورد کلرید و هیدروکسید باریم حاکی از عملکرد آن‌ها در کاهش تمرکز سولفات در ترکیبات سیمانی و اجتناب از توسعهٔ روند تولید محصولات تخریبی در خاک-سیمان است که این امر باعث می‌شود خلل و فرج به‌وسیلهٔ محصولات هیدراتاسیون سیمان پر شود [۴۷]، و با ایجاد جسمی توپر به افزایش مقاومت مجموعه در مقابل سولفات منتج شده است. تحقیقات مشابه روی بتن [۳۲] نیز تأییدکنندهٔ نتایج به‌دست آمده در این تحقیق است به‌نحوی که بیان می‌دارد سیمان در ترکیب با هیدروکسید باریم ریزساختارهای متراکم‌تری به‌وجود می‌آورد و محصولات خوردگی (نظیر گچ و اترینگایت) کم‌تری تولید می‌شود.



شکل ۴۳. عکس‌های SEM، تغییرات مورفولوژی ریزساختارها که در سولفات ٪۵ ایجاد شده

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.2.4.1]
[DOI: 10.52547/jeg.15.2.177]

است به‌ازای عیار (kg/m^3) ۳۰۰ سیمان تیپ دو در ترکیب با الف) کلرید باریم، ب) هیدروکسید باریم؛ بالا: بزرگ‌نمایی ۵۰۰ و پایین: بزرگ‌نمایی ۱۰۰۰۰

بحث و نتیجه‌گیری

نتایج به‌دست‌آمده در دو بخش تحقیق حاضر بدین‌صورت قابل جمع‌بندی است:

بخش اول

از نتایج این بخش مشاهده می‌شود که با تعریف f_c مطابق با توصیه FHWA، در حالت سولفات ۰٪، برای هر سه عیار سیمان مصرفی ((kg/m^3)۲۰۰، (kg/m^3)+(۳۰۰ و (kg/m^3)۴۰۰) رابطه‌ای لگاریتمی با ضرایب مشابه با رابطه پیشنهادی FHWA به‌دست آمد که خود بر درستی روند آزمایش‌های انجام شده صحه می‌گذارد.

در حالت‌های خاک-سیمان سولفاته (۲٪ و۵٪)، روند افزایش مقاومت نسبت به زمان تا سن مشخصی افزایشی و لگاریتمی است. زمان رسیدن به نقطهٔ عطف نمودار q_u-t و تبدیل روند افزایش مقاومت به کاهش و درواقع خروج از روند لگاریتمی، متناسب با عیار سیمان مصرفی و درصد سولفات موجود متغیر است.

مشاهده روند تغییرات f_c در حالات سولفات ۲٪ و۵٪ بیان‌گر آن است که افزایش میزان عیار سیمان ضدسولفات نقش تعیین‌کننده‌ای در میزان محدودسازی اثرات حمله سولفاتی دارد؛ به‌عنوان شاهدان این پدیده می‌توان اولاً به زمان (سن) خروج از روند لگاریتمی در هر سه منحنی ((kg/m^3)۲۰۰، (kg/m^3)۳۰۰ و (kg/m^3)۴۰۰) اشاره کرد که در مورد سیمان با عیار بیش‌تر سن مذکور بیش‌تر است و نقطهٔ عطف دیرتری اتفاق می‌افتد که خود بیان‌گر اثر مقابله سیمان ضد سولفات در مدت‌زمان بیش‌تر است و ثانیاً به شیب منحنی f_c که بعد از خروج از روند لگاریتمی، در عیارهای بالای سیمان و سولفات کم‌تر کندتر می‌شود به‌طوری‌که در عیار (kg/m^3) (علی‌الخصوص در سولفات ۲٪) شیب مذکور رو به صفر شدن می‌نهد.

چنان‌که در نتایج این بخش مشاهده می‌شود، برای محدود ساختن اثرات سولفات با غلظت ۲٪ لازم است عیار سیمان ضد سولفات به بیش از (kg/m^3) ۴۰۰ افزایش یابد.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.2.4.1]
[DOI: 10.52547/jeg.15.2.177]

عکس‌های SEM به‌خوبی نشان می‌دهند که نمونه‌های دارای سیمان بیش‌تر، دارای تراکم بیش‌تر و محصولات تخریب کم‌تری است. این امر نتایج به‌دست‌آمده از مقاومت تک‌محوری را نیز تأیید می‌کند.

بخش دوم

ترکیب خاک با سیمان تیپ دو (عیار (kg/m^3) ۳۰۰) به‌اضافه افزودنی‌های کلرید و هیدروکسید باریم، مقاومت‌های بیش‌تری را نسبت به خاک-سیمان حاوی سیمان تیپ پنج (با همان عیار سیمان) نتیجه داده است به‌طوری‌که CSL در ۳۶۲ روز برای سیمان تیپ دو و ترکیبات باریم به کم‌تر از ۳۰٪ محدوده شده است؛ حال‌آن‌که در رابطه با سیمان تیپ ۵ با عیار (kg/m^3) ۳۰۰ در همان شرایط سولفاتی تا ۷۰٪ هم پیش رفته است.

در ترکیب با سیمان تیپ دو، افزودنی هیدروکسید باریم در مقایسه با کلرید باریم (با همان نسبت اختلاط) توانسته است بهتر عملکرد سولفات را کنترل کند به‌طوری‌که در ۳۶۲ روز میزان CSL به کم‌تر از ۱۰٪ محدود شده است؛ حال‌آن‌که در ترکیب کلرید باریم این مقدار در حدود ۳۰٪ است و هم‌چنان روند افزایشی دارد.

- از مقایسه نتایج حاصل از ترکیب سیمان تیپ دو با هیدروکسید باریم و سیمان تیپ پنج فاقد سولفات (نمونه‌های کنترل) نتیجه می‌شود که گروه نخست تا سن ۹۱ روز مقادیر بزرگ‌تری از مقاومت تک‌محوری به‌دست آمده است که این مطلب شاهدی است بر اثرات افزایش مقاومتی هیدروکسید باریم به‌عنوان یک افزودنی.
- عکس‌های SEM به‌خوبی تغییر مورفولوژی و متراکم‌تر شدن ریزساختارهای سیمانی را در مورد کلرید و هیدروکسید باریم نشان می‌دهند که ناشی از عملکرد آن‌ها در کاهش تمرکز سولفات و محصولات سولفاتی در ترکیبات سیمانی است. این امر منتج به افزایش مقاومت مجموعه در مقابل سولفات شده است.
- نتایج ارائه شده در این مقاله، بر اساس آزمایش‌های انجام شده روی مصالح معرفی شده (سیمان‌های ضد سولفات پرتلند و ماسه فیروزکوه) است. علی رغم گستردگی قابلیت کاربرد سیمان پرتلند در اکثر خاک‌ها، با عنایت به نقش اساسی جنس ذرات خاک در ترکیب شیمیایی مخلوط و تأثیر آن بر مقاومت مخلوط خاک-سیمان، پیشنهاد

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.2.4.1]
[DOI: 10.52547/jeg.15.2.177]

می‌شود قبل از به‌کارگیری نتایج این تحقیق در خاک‌های دیگر، آزمایش‌های مشابه انجام شود.

منابع

1. Mitchell J. K., Cooke H. G., Schaeffer J.A., "Design considerations in ground improvement for seismic risk mitigation", Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics III, ASCE, (1998) 580-613.
2. Idriss I. M., Boulanger R. W., "Soil liquefaction during earthquakes", Earthquake Engineering Research Institute (2008).
3. Porbaha A., Tanaka H., Kobayashi M., "State of the art in deep mixing technology: part II. Applications", Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Ground Improvement, 2 (1998) 125-139.
4. Andromalos K. B., Hegazy Y. A., Jasperse B. H., "Stabilization of soft soils by soil mixing", Soft ground technology (2001) 194-205.
5. Porbaha A., "State of the art in deep mixing technology: part I. Basic concepts and overview", Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Ground Improvement, 2 (1998) 81-92.
6. Puppala A. J., Madhyannapu R. S., Nazarian S., Yuan D., Hoyos L. R., "Deep soil mixing technology for mitigation of pavement roughness", FHWA/TX-08/0-5179-1 (2008).
7. Atashband S., "Improvement of deep soil mixing behavior in aggressive conditions using suitable additives", Department of Civil engineering, Islamic Azad University, Arak (2019).
8. Sabermahani M., Ghalehnovi V., Elahi H., Atashband S., "Jet-Grouting Columns Performance of Foundation Improvement-A case study", Journal of Engineering Geology, 12 (2019) 467-486.
9. Bruce M. E. C., Berg R. R., Collin J. G., Filz G. M., Terashi M., Yang D. S., Geotechnica S., "Federal Highway Administration design manual: Deep mixing for embankment and foundation support", United States.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.2.4.1]
[DOI: 10.52547/jeg.15.2.177]

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.2.4.1]

[DOI: 10.52547/jeg.15.2.177]

Federal Highway Administation. Offices of Research & Development, (2013).

10. Marchand J., Odler I., Skalny J. P., "Sulfate attack on concrete", CRC Press (2003).
11. Jessica Elzea Kogel N. C. T., James M. Barker, "Stanley T. Krukowski, Industrial Minerals & rocks commodities, markets and uses", Society for mining, metallurgy and exploration, Inc., 8307 Shaffer Parkway, Littleton, Colorado, USA 80127, (303) 948-4200 / (800) (2006) 763-3132,.
12. Garrett D. E., "Sodium sulfate handbook".
13. Neville A. M., "Properties of concrete", Pitman Books, London (1981).
14. Al-Amoudi O. S. B., Maslehuddin M., Saadi M. M., "Effect of magnesium sulfate and sodium sulfate on the durability performance of plain and blended cements", ACI Materials Journal, 92 (1995) 15-24.
15. Al-Dulaijan S. U., Maslehuddin M., Al-Zahrani M., Sharif A., Shameem M., Ibrahim M., "Sulfate resistance of plain and blended cements exposed to varying concentrations of sodium sulfate", Cement and Concrete Composites, 25 (2003) 429-437.
16. Rollings R. S., Burkes J. P., Rollings M. P., "Sulfate attack on cement-stabilized sand M.P., Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, 125 (1999) 364-372.
17. J. Prasad, D. Jain, A. Ahuja, Factors influencing the sulphate resistance of cement concrete and mortar, DOI (2006).
18. M. Rollings, R. Rollings, Sulfate attack on bound bases, Annual Meeting of the Transportation Research Board. Washington, DC, 2003.
19. Lambe T. W., Michaels A., Moh Z.-C., "Improvement of Soil-Cement with Alkali Metal Compounds and Discussion", Highway Research Board Bulletin, DOI (1960).
20. Sherwood P., "Effect of sulfates on cement-and lime-stabilized soils", Highway Research Board Bulletin, DOI (1962).

21. Sherwood P., "Soil stabilization with cement and lime", (1993).
22. Wang L., "Cementitious stabilization of soils in the presence of sulfate", DOI (2002).
23. Wang L., Roy A., Seals R., Metcalf J., "Stabilization of sulfate-containing soil by cementitious mixtures mechanical properties", Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, DOI (2003) 12-19.
24. Committee A., Standardization I. O. f., "ACI 318-08 Building code requirements for structural concrete and commentary", American Concrete Institute (2008).
25. Saleh I. S., "Effect of External and Internal Sulphate on Compressive Strength of Concrete", International Journal of Applied Engineering Research, 12 (2017) 10324-10333.
26. Rezaeimalek S., Nasouri A., Huang J., Bin-Shafique S., Gilazghi S. T., "Comparison of short-term and long-term performances for polymer-stabilized sand and clay", Journal of traffic and transportation engineering (English edition), 4 (2017) 145-155.
27. Carmona-Quiroga P. M., Blanco-Varela M. T., "Use of barium carbonate to inhibit sulfate attack in cements", Cement and Concrete Research, 69 (2015) 96-104.
28. Anitha P., Benny M. A., "A study on mitigating the effect of sulphates in lime stabilised Cochin marine clays", Cochin University of Science & Technology (2014).
29. Bazyar M. H., Ebrahimi M., Lenjani M. Z., Makarchian M., Univeersity Y., "The Effect of Rice Husk Ash on Mechanical Properties of Clayey Soils Stabilized with Lime in the Presence of Sulphate", Journal of Engineering Geology, 11 (2017) 23.
30. Ferris G., Eades J., Graves R., McClellan G., "Improved characteristics in sulfate soils treated with barium compounds before lime stabilization", Transportation Research Record, DOI (1991).

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.2.4.1]
[DOI: 10.52547/jeg.15.2.177]

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.2.4.1]

[DOI: 10.52547/jeg.15.2.177]

31. Su Y., Wei X., Huang J., Wang Y., He X., Wang X., Ma B., "Use of different barium salts to inhibit the thaumasite form of sulfate attack in cement-based materials", Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed., 31 (2016) 361-366.
32. ZHAO L., LIU J.-h., JI H.-g., "Performance improvement and mechanism of concrete with the addition of barium hydroxide reagent in typical sulfate environment H.-g., Journal of China Coal Society, DOI (2017) 12.
33. Salamatpoor S., Jafarian Y., Hajiannia A., "Physical and mechanical properties of sand stabilized by cement and natural zeolite", The European Physical Journal Plus, 133 (2018) 205.
34. "ASTM_C150-04, Standard specification for Portland cement", American Society for Testing and Materials, (2004) 1-8.
35. "ASTM_D2487, Standard classification of soils for engineering purposes, American Society for Testing and Materials", West Conshohocken, PA, USA, (2006)1-12.
36. "ASTM_D421, Standard practice for dry preparation of soil samples for particle-size analysis and determination of soil constant", American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, USA, (2002) 1-2.
37. "ASTM_D422, Standard test method for particle-size analysis of soils, Annual Book of ASTM Standards", American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, USA, (2003) 1-8.
38. Mehdi Zadehmohamad J. B. B., "Cyclic behaviour of geocell-reinforced backfill behind integral bridge abutment", International Journal of Geotechnical Engineering, DOI (2017) 1-13.
39. Ghalandarzadeh A., Bahadori H., "Study of the Cyclic Behavior of Saturated Sand Considering the Effect of Induced Anisotropy" Journal ofcivil and Sarveuing Engineering Journal of Faculity of Engineerings, Vo. 2, (2010) 151-163

40. Farahmand K., Lashkari A., Ghalandarzadeh A., "Firoozkuh sand: introduction of a benchmark for geomechanical studies", Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering, 40 (2016) 133-148.
41. Wikipedia, "Barium chloride", Wikipedia contributors (2019).
42. Wikipedia, "Barium hydroxide", Wikipedia contributors (2019).
43. Bertolacini R., Barney J., "Colorimetric determination of sulfate with barium chloranilate", Analytical Chemistry, 29 (1957) 281-283.
44. "ASTM_D1632, Standard practice for making and curing soil-cement compression and flexure test specimens in the laboratory", American Society for Testing and Materials (2007).
45. Kitazume M., Terashi M., "The deep mixing method, CRC press2013.
46. ASTM_D1633, Standard test methods for compressive strength of molded soil-cement cylinders", ASTM International West Conshohocken, PA (2007) 1-4.
47. Li Z., Guo W., Li Y., Liu J., Wang Y., "Effect of Sulphate on Compressive Strength of Cement Stabilized Soil", DOI (2015).

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.2.4.1]
[DOI: 10.52547/jeg.15.2.177]