بررسی موردی عملکرد ستون‌های جت‌گروتینک در بهسازی بستر پی گسترده

محسن صابرماهانی، ولی‌اله قلعه‌نوی*؛ دانشگاه علم و صنعت
حمیدرضا الهی، شهام آتش‌بند؛ دانشگاه علم و فرهنگ

تاریخ: دریافت ۹۵/۰۲/۲٦ پذیرش ۹۵/۱۱/۲٤

چکیده

جت‌گروتینگ یکی از روش‌های بهسازی بستر و پایدارسازی شیب‌ها است که به‌کمک آن می‌توان ظرفیت باربری قائم یا جانبی زمین موردنظر را از طریق تزریق دوغاب سیمان تحت فشار افزایش داد. در این تحقیق، بهسازی خاک با المان‌های جت‌گروت در یکی از شهرهای ساحلی شمال ایران بررسی می‌شود. نتایج تزریق دوغاب سیمان به‌روش تک‌سیالی به‌همراه شرایط ژئوتکنیکی خاک محل ارائه می‌شود. قطر ستون‌های جت‌گروت، مقاومت تک‌محوری مغزه‌های گرفته‌شده و درصد بازیابی مغزه‌ها به‌عنوان مهم‌ترین پارامترهای ارزیابی عملکرد بهسازی در معیارهای موجود، استفاده شده و بر اساس نتایج آن، طرح اولیه اصلاح و اجرا شده است. هم‌چنین مشاهده شد که در صورت تأمین فشار تزریق ٤٥٠ بار در ماسه سیلتی اشباع و غیراشباع با اعداد SPT متوسط به‌ترتیب ۱۳ و ۲۰، با سرعت بالا آمدن راد ۰/۵ سانتی‌متر برثانیه و چگالی دوغاب ۱٦۰۰ gr/cm^3، به‌ترتیب ستون‌هایی با قطر ۸۰ cm و ۱۰۰ cm به‌دست می‌آید که مغزه‌های استخراجی از ستون‌های اجراشده در ماسه سیلتی اشباع دارای مقاومت تک‌محوری ٤۰ kg/cm^2 است. با توجه به زمان اجرای کوتاه نسبت به حجم عملیات بهسازی، روش جت‌گروتینگ روشی مناسب و اقتصادی در زمین‌های ماسه‌ای اشباع و غیراشباع برای تأمین ظرفیت باربری موردنیاز است و معیار نرخ بهسازی در ارزیابی مقاومت تک‌محوری مغزه‌های استخراجی از خاک بهسازی شده و تصحیح ظرفیت باربری ستون‌های جت‌گروت کارایی مناسبی از خود نشان داده است.

واژه‌های کلیدی: بهسازی بستر، جت‌گروتینگ، تزریق پرفشار، معیار ارزیابی عملکرد، مقاومت فشاری محصور نشده

*نویسنده مسئول V_ghalehnovi@civileng.iust.ac.ir

مقدمه

جت‌گروت (تزریق پرفشار) یکی از روش‌های بهسازی خاک است که در اوایل دههٔ ۸۰ میلادی مهندسان ژاپنی ابداع کردند. در ابتدا جت‌گروتینگ به‌صورت شستن و فرسایش خاک به‌وسیلهٔ جت‌آب و سپس پر کردن ناحیهٔ فرسایش یافته با دوغاب شیمیایی تزریق‌شده از نازل بود که به روش CCP[1] شناخته می‌شد [۱], [۲]. در این روش نازل بدون دوران بالا کشیده می‌شد و هدف تشکیل پانل‌های سیمانی شدهٔ قائم بود. روش ستون‌های جت‌گروت را مدتی بعد یک شرکت ژاپنی "Kajima" ابداع کرد و به‌جای ترکیبات شیمیایی از سیمان در ساخت دوغاب آن استفاده شد که در آن بیرون کشیدن نازل هم‌زمان با دوران آن نیز بود که JSP[2] نام داشت [۳]. روش مشابهی در همان زمان یاهیرو و یوشیدا ابداع کردند که جت‌گروت نام گرفت [٤], [٥]. در حال حاضر جت‌گروت شامل سه روش عمده است که عبارت‌اند از روش‌های تک سیال[3]، دو سیال[4] و سه سیال[5] که نام‌گذاری این روش‌ها به تعداد سیال‌های تزریق‌شده از نازل که می‌توانند هوا، آب و دوغاب سیمان باشند بستگی دارد. در ابتدا از جت‌گروتینگ تنها برای بهبود خصوصیات خاک در زیر پی سازه‌های بزرگ استفاده می‌شد اما کاربرد آن امروزه شامل گودبرداری، تونل‌سازی، فورپولینگ، دیوارهای آب‌بند و دوخت به پایین نیز است [٦] به‌طوری‌که اکنون جت‌گروتینگ به‌روشی سریع با کاربردهای متنوع به‌عنوان یکی از محبوب‌ترین روش‌های بهسازی خاک بدل شده است [٦]. در ایران نیز این روش از سال ۱۳۸٤ به‌عنوان تکنیکی موفق در چندین پروژه بهسازی موردتوجه قرارگرفته است. در این پژوهش به‌بررسی عملیات بهسازی بستر، مجتمع تفریحی-تجاری واقع در شهر کلارآباد مازندران، به‌روش ستون‌های جت‌گروت می‌پردازیم

مشخصات پروژه

این مجتمع در شهر کلارآباد در حاشیهٔ دریای خزر واقع شده است که شامل دوطبقه پارکینگ،

1. Chemical Churning Pile
2. Jambo Special Pile
3. Single Fluid
4. Double Fluid
5. Triple Fluid

[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.3.1.9]

[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.3.467]

طبقه همکف و ٥ طبقه بالای آن در زمینی به مساحت ٣٤٠٠ مترمربع است. در شکل ١ موقعیت پروژه با پیکان قرمز روی نقشه نشان داده‌شده است

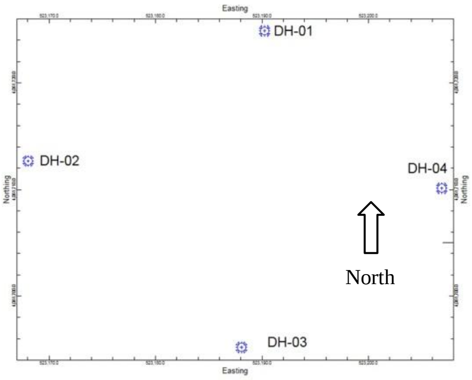
شکل ١. موقعیت ساختگاه بررسی شده

سطح آب زیرزمینی در این منطقه در عمق ٦ متری از سطح زمین است که به‌دلیل خاک‌برداری به عمق ٥ متر، سطح آب در تراز ١ متر کف فونداسیون است. خصوصیات ژئوتکنیکی خاک از ٤ گمانه ماشینی حفاری‌شده در محدودۀ پروژه که موقعیت آن‌ها در شکل ٢ نشان داده شده، به‌دست آمده است. شکل ٢ عمق و مختصات گمانه‌ها را نشان می‌دهد و جدول ٢ نیز اطلاعات مربوط به شرایط ژئوتکنیکی ساختگاه را ارائه می‌دهد. در این پروژه پیش‌بینی شده است که پس از انجام عملیات بهسازی بستر ١ متر دیگر خاک‌برداری انجام شود و تراز زیر پی هم‌تراز سطح آب‌های زیرزمینی (٦ متر) شود. شکل ٣ اعداد نفوذ استاندارد را

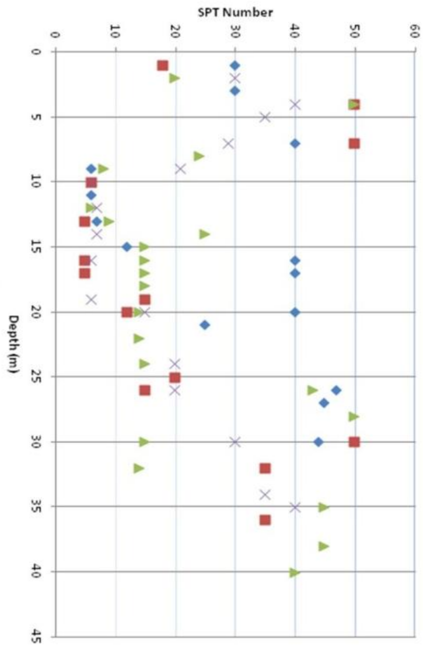
برای گمانه‌های ۱ تا ٤ نمایش می‌دهد. در **شکل ۴** لایه‌بندی خاک بر اساس اطلاعات گمانه‌ها نمایش داده شده است.

جدول ۱. عمق و مختصات گمانه‌ها

شمارهٔ گمانه	عمق (متر)	Y	X
۱	۳۰	٥٢٣١٩٦	٤٠٦١٧٢٥
۲	۳٥	٥٢٣١٦٨	٤٠٦١٧١٤
۳	٤٠	٥٢٣١٨٢	٤٠٦١٦٠٥
٤	۳٥	٥٢٣٢١٢	٤٠٦١٦٩٢



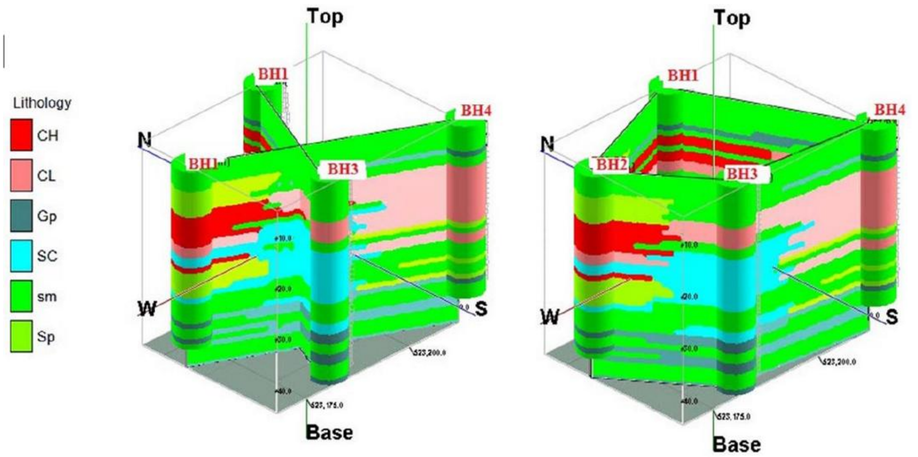
شکل ۳. موقعیت گمانه‌های ژئوتکنیکی



شکل ٤. تغییرات عدد نفوذ استاندارد در عمق (گمانه‌های BH1، BH2، BH3 و BH4 سایت بررسی شده

جدول ۲. پارامترهای ژئوتکنیکی ساختگاه بررسی شده

جنس لایه	عمق لایه	میانگین عدد نفوذ استاندارد	توضیحات
لایه ماسه‌ای - شنی فوقانی	از سطح زمین تا عمق حداکثر ۱۰ متری	۳۰	ماسه و شن به‌صورت لایه‌های متناوب
لایه رسی- سیلتی	از زیر لایه فوقانی تا عمق حداکثر ۲۱ متری	۷ و در بخش‌های ماسه‌ای تا ۲۰ هم می‌رسد	رسی با پلاستیسیته بالا و سیلت با پلاستیسیته پایین همراه لنزهای ماسه-شنی با میزان مواد آلی زیاد همراه با رنگ تیره و بوی بد
لایه ماسه‌ای - شنی	از زیر لایهٔ رسی-سیلتی شروع‌شده و تا عمق حداکثر ۳۷ متر ادامه دارد	۳۵	شن و ماسه گرد گوشه فاقد چسبندگی با تراکم بالا
لایه شنی - قلوه‌سنگی	۳۷ متر به پایین	به‌دلیل درشت بودن ذرات آن که عموماً گرد گوشه هستند عدد نفوذ استاندارد بالا است	-



شکل ۵. لایه‌بندی خاک بر اساس گمانه‌ها

انتخاب روش بهسازی

با توجه به مشخصات خاک منطقه (وجود لایه‌های رسی و ماسه اشباع سست) که علاوه بر تحمیل نشست‌های زیاد آنی و تحکیمی، زمین پروژه را مستعد پدیده روان‌گرایی می‌گرداند، تثبیت خاک در زیر پی اجتناب‌ناپذیر است. به‌دلیل تجربه نامطلوب در پروژهٔ مجاور (آب‌گرفتگی تمام طبقات زیرزمین در اثر بارندگی‌های شدید و ایجاد خسارات مالی فراوان در مجتمع تجاری پانوراما) تصمیم گرفته شد تا کل قسمت مدفون پروژه در قنداقی از ژئوممبرین

پیچیده شود تا امکان نفوذ آب به داخل ساختمان وجود نداشته باشد؛ ازاین‌رو از میان گزینه‌های در نظر گرفته‌شده برای بهسازی بستر این پروژه (شمع، ریزشمع، ستون‌های اختلاط عمیق خاک، ستون‌های سنگی و ستون‌های جت‌گروت) گزینه‌های ستون‌های اختلاط عمیق خاک، ستون‌های سنگی و ستون‌های جت‌گروت به‌دلیل ایجاد امکان آب‌بند ساختن هرچه بیش‌تر سازه (زیرا در این روش‌ها پی به المان‌های بهسازی خاک متصل نیست) قابل‌اجرا بودند که به دلیل ابعاد نه‌چندان بزرگ پروژه، روش ستون‌های اختلاط عمیق خاک که دارای هزینهٔ تجهیز زیادی است، از نظر اقتصادی توجیه‌پذیر نبود. از میان دو روش باقی‌مانده، روش ستون‌های جت‌گروت به‌دلیل سرعت اجرای زیاد آن نسبت به‌روش ستون‌های سنگی در شرایط خاص پروژه مورد نظر و اهمیت زیاد زمان‌بندی برای کارفرما، انتخاب شد.جدول ۳ امتیاز روش‌های مختلف بهسازی را در این پروژه با توجه به جمیع ملاحظات مذکور مشخص می‌کند و امتیازات مقایسه‌ای ۱ تا ۵ (۵: خیلی خوب، ...، ۱: خیلی ضعیف) بین روش‌های مختلف به‌صورت نسبی به هریک از روش‌های اختصاص‌یافته است.

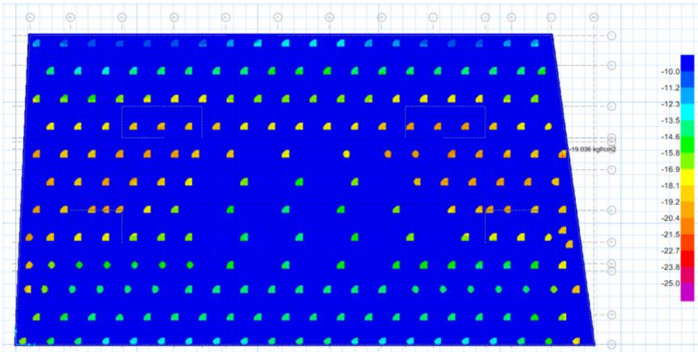
جدول ۳. مقایسهٔ کلی روش‌های بهسازی بستر پروژه و امتیازدهی

ردیف	روش	امکان آب‌بندی پی	کنترل و تضمین کیفیت	سهولت و زمان اجرا	هزینه اجرا	جمع
۱	شمع	۳	٤	۱	٤	۱۲
۲	ریزشمع	۱	۵	۲	۵	۱۳
۳	ستون‌های اختلاط عمیق	۵	۳	۳	۱	۱۲
٤	ستون‌های سنگی	۵	۳	٤	۳	۱۵
۵	ستون‌های جت‌گروت	۵	۳	۵	۳	١٦

مروری بر طرح اولیه

پیمانکار طرح و اجرای پروژه با توجه به بار وارده از طرف سازه بر پی و هم‌چنین محاسبهٔ ظرفیت باربری ستون‌ها بر طبق تجربیات اجرایی خود در زمین‌های مشابه، تعداد ۲۲۱ عدد ستون را با چیدمانی مشابه شکل ۵ به‌منظور بهسازی بستر موردنظر پیش‌بینی و پیشنهاد شد.

جانمایی ستون‌های جت‌گروت به‌گونه‌ای در نظر گرفته شده که تراکم ستون‌ها متناسب با توزیع بار وارده از طرف سازه بر فونداسیون باشد. کاهش تراکم ستون‌های جت‌گروت در قسمت میانی به‌دلیل وجود یک فضای خالی در معماری سازه است



شکل۵ پلان جانمایی و تنش‌های وارد بر ستون‌های جت‌گروت در طرح اولیه (kg/cm^2)

فرضیات در نظر گرفته‌شده توسط پیمانکار طرح و اجرا بدین‌صورتاست:

- قطر ستون‌های جت‌گروت: ۱ m
- عمق ستون‌های جت‌گروت: ۱۲ m
- فواصل ستون‌های جت‌گروت: ٤ m الی ۸ m
- مقاومت تک‌محوری مغزه‌ها: ٦۰ kg/cm^2

لازم به ذکر است که این فرضیات کاملاً تجربی است و بر اساس پروژه‌های مشابه در نظر گرفته شده است و عمق ستون‌های جت‌گروت با توجه به‌وجود لایه ماسه سست اشباع به ضخامت ۷ متر و لجن به ضخامت ۵ متر برابر ۱۲ متر برای عبور از لایه‌های مذکور و رسیدن به بستر مناسب با SPT بالای ۲۵ در نظر گرفته شده است.

در نتیجه ظرفیت جدار و نوک ستون‌های جت‌گروت به‌ترتیب برابر ton ۱۵۵ و ٥٤ ton با احتساب ضریب اطمینان ۲/۵ محاسبه شد که پیش‌بینی می‌شد این امر با رعایت مشخصات فنی ذیل به‌دست آید:

- چگالی دوغاب سیمان: ١٦٠٠ kg/lit
- فشار تزریق: ٤٥٠ bar

- سرعت چرخش و بالا آمدن نازل: ٤–٨–٤ (دوران نیم‌دور بر ثانیه و بالا آمدن ٤ سانتی‌متر در هر ۸ ثانیه)

مانند اغلب پروژه‌های ژئوتکنیک و با توجه به ماهیت روش جت‌گروت به‌عنوان روش طراحی حین اجرا[1] لازم شد که جزئیات طرح مذکور پس از شروع عملیات اجرایی و کسب مشاهدات فنی حاصل از آزمایش‌های کنترلی مورد تجدید نظر قرار گیرد. نتایج این دسته از اقدامات را که نویسندگان انجام داده‌اند در ادامه به‌طور مبسوط ارائه شده است.

آزمایش‌های کنترلی حین اجرا

آزمایش‌های کنترلی پس از ساخت به‌منظور صحت‌سنجی کیفیت و کمیت کار انجام شده انجام می‌شود که به‌طورکلی شامل کنترل قطر و ظرفیت باربری ستون‌های جت‌گروت است. در ادامه به بیان آزمایش‌های صورت گرفته در این پروژه و نتایج حاصل می‌پردازیم.

۱. کنترل نسبت آب به سیمان دوغاب

چگالی دوغاب، نسبت آب به سیمان را مشخص می‌کند که در پروژهٔ حاضر این نسبت از این رابطه به‌دست می‌آید:

$$D_C \times V_C + D_W \times V_W = 1600gr$$
$$V_C + V_W = 1000cm^3$$
$$(1) + (2) = w/c = 0.82$$

که در آن:

D_C و D_W به‌ترتیب چگالی سیمان و آب است که برابر ۳/۱۵ و ۱ گرم بر سانتی‌متر مکعب است و V_C و V_W نیز حجم سیمان و حجم آب هستند. W و C نیز به‌ترتیب برابر جرم آب و جرم سیمان هستند.

برای کنترل این نسبت، جرم یک لیتر دوغاب گرفته‌شده از مخلوط‌کن ثانویه در طی مراحل اجرا به‌صورت مداوم کنترل می‌شود که باید برابر ۱٦۰۰ gr باشد.

۲. کنترل قطر ستون‌های جت‌گروت

مطمئن‌ترین روش کنترل قطر ستون‌های جت‌گروت، روش مشاهده‌ای است. برای این

1. Design as you go

[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.3.1.9]

[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.3.467]

منظور باید خاک اطراف تعدادی از ستون‌های اجراشده را برداشته و تغییرات قطر ستون در لایه‌های مختلف را اندازه‌گیری کرد. قطر هر ستون در صورتی قابل‌قبول است که در کوچک‌ترین مقطع شکل‌گرفته در طول ستون، قطر بزرگ‌تر یا مساوی قطر فرض شده در طراحی باشد. شکل ٦ تعدادی از ستون‌های جت‌گروت در پروژه حاضر را که به‌منظور اندازه‌گیری قطر، خاک اطرافشان برداشته شده است نشان می‌دهد. بر اساس مشاهدات صورت گرفته مشخص شد که میانگین قطر ستون‌های جت‌گروت در لایۀ خاک ماسه‌ای اشباع برابر ۸۰ cm است و در لایه خاک ماسه‌ای غیراشباع برابر ۱۰۰ cm با مشخصات فنی اجرای این پروژه به‌دست‌آمده است. ازاین‌رو، قطر در نظر گرفته شده برای ستون‌ها به ۸۰ cm کاهش یافت.

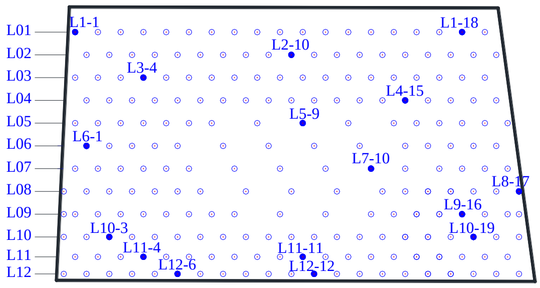
شکل ٦. برداشتن خاک اطراف ستون‌ها به‌منظور کنترل قطر

آزمایش مغزه گیری از ستون‌های جت‌گروت:

از بین روش‌های کنترلی موجود شامل آزمایش بارگذاری بزرگ‌مقیاس، مغزه‌گیری و روش‌های مبتنی بر لرزه‌نگاری، متداول‌ترین روش کنترل ظرفیت باربری ستون‌ها مغزه‌گیری است. در پروژۀ بررسی شده ١٦ ستون جت‌گروت که در شکل ۷ مشخص شده‌اند، با استفاده از نمونه‌گیر سه جداره مغزه‌گیری شدند.

[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.3.1.9]

[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.3.467]



شکل ۷. موقعیت ستون‌های مغزه‌گیری شده در پلان

شکل ۸ و ۹ به‌ترتیب مته سه جداره نمونه‌گیر و جعبه نمونه را برای یکی از ستون‌ها نمایش می‌دهند

شکل ۸. جعبه نمونه محتوی مغزه‌های به‌دست‌آمده از ستون L6-1 تا عمق ٦ متر

شکل ۹. مته سه جداره مغزه گیری به‌همراه محفظه

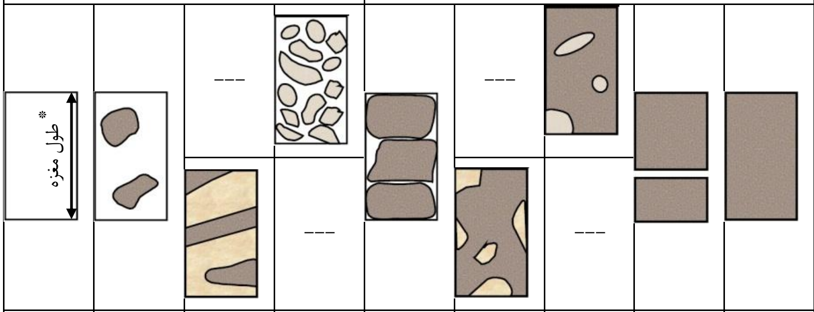
پس از مغزه‌گیری از هر ستون، شاخص‌های مربوط به بازیابی مغزه[1] و تعیین کیفیت سنگ[2] ثبت‌شده و مطابق روش پیشنهادی یوشیتاکه و همکاران [٧] کیفیت بهسازی بدین‌صورت مورد ارزیابی می‌شود.

$$C_i = \frac{\sum L_W}{L} \times 100\ (\%) \qquad (١)$$

در رابطهٔ (١) C_i نرخ بهسازی، L_W طول خوب بهسازی شده و L طول کل مغزه‌گیری شده است. L_W مطابق جدول ٤ قابل‌محاسبه است

1. Core Recovery:CR
2. Rock Quality Designation:RQD

جدول ٤ . معیار وضعیت بهسازی [۷]

سطح	۱		۲		۳	٤		٥	٦
ارزیابی	بهسازی خوب					بهسازی ضعیف			
شمای مغزه (ماسه / رس)									
وضعیت مغزه	مغزه سخت و همگن بدون ترک	مغزه تقریباً همگن بدون ترک	شامل ذرات ریز ماسه	شامل تکه‌های رس	توده خردشده	قلوه‌سنگ‌ها ی پراکنده	شامل توده‌های رس پراکنده	تکه‌های صلب اندک، عموماً خاک	خالی

***طول مغزه‌های نشان داده‌شده ۲۰ سانتی‌متر است.**

مغزه‌های دارای سطح ۱ و ۲ را می‌توان مطابق شکل ۱۰ تحت آزمایش تک‌محوری قرارداد اما این امکان برای تعیین مقاومت سایر مغزه‌ها وجود ندارد و مغزه‌های مربوط به سطح ٤ به بعد درواقع مقاومتی بسیار کم‌تر از حد انتظار دارند؛ بنابراین می‌توان مقاومت آن‌ها را صفر فرض کرد. اکثر مغزه‌هایی که در سطح ۳ قرار دارند به‌دلیل شرایط مربوط به مغزه‌گیری تکه‌تکه شده‌اند و درواقع مقاومت بیش‌تری درون خاک از خود نشان خواهند داد و می‌توان مقاومت آن‌ها را از ضرب ضریب کاهنده در میانگین مقاومت مغزه‌های سطح ۱ و ۲ به‌دست آورد که ضریب مربوط برابر ۰/۵ در نظر گرفته‌شده است [۷].

اصلاح طرح اولیه

با توجه به نتایج آزمایش‌های حین اجرا و مشاهده عدم تطابق با فرضیات اولیه طراح، مشخصات ستون‌های جت‌گروت را نویسندگان اصلاح کردند و طرح جدید بر مبنای مشخصات اصلاح شده ارائه شد که در ادامه به آن می‌پردازیم.

۱. محاسبه ظرفیت باربری سازه‌ای

جدول ٥ نتایج حاصل از آزمایش تک‌محوری روی نمونه‌های قابل بارگذاری را نمایش

می‌دهد. با توجه به سن نمونه‌ها و نوع خاک در محل نمونه، مقادیر مقاومت فشاری تک‌محوری به‌دست‌آمده به‌وسیلهٔ نمودار شکل ۱۱ اصلاح‌شده‌اند

شکل ۱۰. بارگذاری تک‌محوری مغزه

جدول ۵. نتایج آزمایش تک‌محوری مغزه‌ها

Results of Uniaxial Load Test on Jet Grouted Coring Specimens

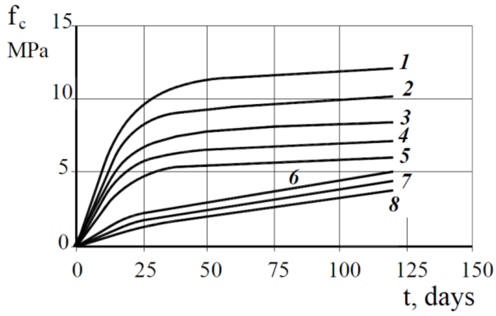
Row		BH NO.	Depth (m)	Imp. Level	Construction Date	Test Date	Strata Type	Age (day)	Per. Of C. S.* (kg/cm^2)	C. S. (kg/cm^2)	Modified C. S. (kg/cm^2)	Description
1	1	L01-18	3.00-3.15	Level 2	93/07/15	93/10/10	SM	85	98.0%	29.2	**29.8**	<60, N.G.
	2		4.00-4.20	Level 1	93/07/15	93/09/10	SC	55	95.7%	59.2	**61.9**	>60, OK.
2	3	L03-14	2.00-2.40	Level 1	93/07/23	93/09/05	SM	42	93.8%	53.8	**57.4**	<60, N.G.
	4		2.00-2.40	Level 1	93/07/23	93/09/10	SM	47	93.8%	66.1	**70.5**	>60, OK.
	5		2.50-2.61	Level 1	93/07/23	93/10/03	SM	70	98.8%	55.2	**55.9**	<60, N.G.
	6		5.00-5.11	Level 3	93/07/23	93/10/03	CH & CL	70	70.0%	38.5	**55.0**	<60, N.G.
	7		10.50-10.75	Level 3	93/07/23	93/09/10	CH & CL	47	56.0%	31.6	**56.4**	<60, N.G.
	8		11.80-12.20	Level 3	93/07/23	93/09/10	SP & SM	47	93.8%	39.1	**41.7**	<60, N.G.
3	9	L04-15	5.20-5.40	Level 3	93/07/22	93/09/10	SC	48	94.3%	66.1	**70.1**	>60, OK.
	10		7.20-7.50	Level 3	93/07/22	93/09/10	CH	48	55.6%	24.3	**43.7**	<60, N.G.

[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.3.1.9]

[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.3.467]

Results of Uniaxial Load Test on Jet Grouted Coring Specimens												
Row	BH NO.		Depth (m)	Imp. Level	Construction Date	Test Date	Strata Type	Age (day)	Per. Of C. S.* (kg/cm^2)	C. S. (kg/cm^2)	Modified C. S. (kg/cm^2)	Description
4	11	L06-01	3.30-3.45	Level 1	93/07/27	93/10/10	SP	73	96.0%	55.2	**57.5**	<60, N.G.
	12		5.80-5.91	Level 2	93/07/27	93/10/03	SP	66	96.1%	15.8	**16.4**	<60, N.G.
5	13	L07-10	2.10-2.21	Level 2	93/08/01	93/10/03	SP	62	93.1%	43.4	**46.6**	<60, N.G.
	14		4.92-5.00	Level 3	93/08/01	93/10/03	SP & SM	62	95.0%	74.2	**78.1**	>60, OK.
	15		6.80-6.91	Level 3	93/08/01	93/10/03	SC & SM	62	95.0%	63.1	**66.4**	>60, OK.
6	16	L10-03	3.30-3.41	Level 3	93/07/27	93/10/03	SP	66	96.1%	59.2	**61.6**	>60, OK.
	17		3.50-3.61	Level 3	93/07/27	93/10/03	SP	66	96.1%	63.1	**65.7**	>60, OK.
7	18	L12-06	2.80-2.91	Level 3	93/08/27	93/10/03	SP & SW	36	88.0%	43.4	**49.3**	<60, N.G.
	19		5.79-5.90	Level 4	93/08/27	93/10/03	SP	36	89.2%	11.8	**13.2**	<60, N.G.
	20		7.00-7.11	Level 1	93/08/27	93/10/03	SP & SM	36	87.5%	59.2	**67.7**	>60, OK.
	21		8.85-9.00	Level 3	93/08/27	93/10/01	SP & SM	34	87.5%	78.9	**90.2**	>60, OK.
8	22	L10-19	3.10-3.25	Level 3	93/08/11	93/10/10	SM	59	94.0%	59.2	**63.0**	>60, OK.
	23		2.80-2.93	Level 3	93/08/11	93/10/10	SP	59	94.0%	42.9	**45.6**	<60, N.G.
9	24	L09-16	4.40-4.55	Level 2	93/08/09	93/10/10	GP	61	96.0%	59.2	**61.7**	>60, OK.
	25		3.30-3.40	Level 1	93/08/09	93/10/10	SM	61	94.0%	34.0	**36.2**	<60, N.G.
	26		1.80-1.95	Level 2	93/08/09	93/10/10	SP	61	94.0%	66.3	**70.5**	>60, OK.
10	27	L08-17	1.60-1.75	Level 1	93/08/06	93/10/10	SP	64	95.0%	26.7	**28.1**	<60, N.G.

*** C.S.: Compression Strength**



شکل ۱۱. گیرش ستون‌های جت‌گروت با توجه به نوع خاک. ۱. ماسه شن‌دار ۲. ماسه ۳. ماسه سیلتی ٤-سیلت ماسه‌ای ٥-سیلت ٦-سیلت رس دار ٧-رس سیلتی ٨-رس [٨]

جدول ٦ با در نظر گرفتن نتایج آزمایش‌های تک‌محوری و روند تعیین معیار وضعیت بهسازی که یوشیتاکه [٧] پیشنهاد کرده است یک ارزیابی از شرایط بهسازی بستر در پروژه بررسی شده ارائه می‌دهد

جدول ٦. ارزیابی بهسازی صورت گرفته

BH	Primary Designed Strength (kg/cm²)	Level 1 & 2: Ci* 1,2	Level 1 & 2: Strength, q_u (kg/cm²)	Level 3: Ci 3	Level 3: Strength, q_u (kg/cm²)	Level 4, 5 & 6: Ci 4, 5, 6	Level 4, 5 & 6: Strength, q_u (kg/cm²)	ALL: Estimated Strength, q_u (kg/cm²)	Evaluation
L01-18	60	41.7%	61.9	33.3%	30.95	25.0%	0	36.1	<60**, N.G.
L03-04	60	33.3%	Min: 55.9 Max:70.5 AVG. =63.2	58.3%	Min:41.7 Max: 56.4 AVG. =49.05	8.3%	0	49.7	<60, N.G.
L04-15	60	33.3%	113.8	50.0%	Min:43.7 Max: 70.1 AVG. =56.9	16.7%	0	66.4	>60, OK.
L06-01	60	33.3%	16.4	0.0%	8.2	66.7%	0	5.5	<60, N.G.
L07-10	60	11.1%	46.6	55.6%	Min:66.4 Max: 78.1 AVG. =72.25	33.3%	0	45.3	<60, N.G.
L10-03	60	10.0%	127.3	20.0%	Min:61.6 Max: 65.7 AVG. =63.65	70.0%	0	25.3	<60, N.G.
L12-06	60	18.2%	67.7	27.3%	Min:49.3 Max: 90.2 AVG. =69.75	54.5%	0	31.3	<60, N.G.

* C_i نرخ بهسازی است که از رابطهٔ (٤) به‌دست می‌آید.

** مقاومت تک‌محوری موردنیاز بر اساس طراحی

[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.3.1.9]

[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.3.467]

با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از جدول ٦ مشاهده می‌شود که وضعیت بهسازی بستر پروژه بررسی شده، پس از عملیات جت‌گروتینگ مطلوب نیست، از این‌رو، مقاومت در نظر گرفته‌شده برای ستون‌های جت‌گروت که بیش‌تر از حد به‌دست‌آمده است، لازم است کاهش یابد و با توجه به ستون‌های اجراشده و منظور کردن مقاومت کاهش‌یافته‌ی جدید برای آن‌ها طرح موجود مورد تجدیدنظر قرار گیرد و سپس اجرا شود. مقاومت کاهش‌یافته با توجه به میانگین مقاومت‌های تک‌محوری حاصل kg/cm^2 ٤٠ در نظر گرفته شد و قطر ستون‌ها نیز با توجه به مشاهدات میدانی از ١ متر به ٨٠ سانتی‌متر کاهش یافت.

ظرفیت سازه‌ای هریک از ستون‌های جت‌گروت با فرض ضریب اطمینان ٢/٥ [٩] و [١٠] مطابق این رابطه به‌دست می‌آید:

$$F_{Structure} = A \times q_u / F.S. = (\pi \times 0.8^2)/4 \times 400/2.5 = 80.4\ ton$$

که در آن:

$F_{structure}$: ظرفیت باربری سازه‌ای ستون جت‌گروت،

A: سطح مقطع ستون جت‌گروت،

q_u: مقاومت تک‌محوری ستون جت‌گروت، و

FS: ضریب اطمینان هسند.

٢. محاسبه ظرفیت باربری ژئوتکنیکی

محاسبه ظرفیت باربری ستون‌های جت‌گروت با توجه با اصطکاک جداره و باربری نوک ستون تعیین می‌شود.

الف) ظرفیت باربری جداره

مطابق نتایج حاصل از پژوهش‌*ای* ژئوتکنیک لایهٔ ضعیف خاک ماسه و لجنی تا تراز ١٢- زیر فونداسیون ادامه دارد ازاین‌رو عمق ستون‌های جت‌گروت برای رسیدن به بستر مناسب ١٢ متر در نظر گرفته شده است. با توجه به لایه‌بندی خاک ٧ متر از طول ستون در لایه‌های ماسه‌ای و ٥ متر از طول آن در لایه‌های لجنی قرار دارد که ظرفیت باربری جداره را می‌توان مطابق روابط (٥) و (٦) محاسبه کرد.

در ماسه:

$$F_{Geo-surface} = \pi \times D \times L \times q_s/F.S. = \pi \times 0.8 \times 7 \times 12/2.5 = 84.4\ ton$$

در رس و لجن:

$$F_{Geo-surface} = \pi \times D \times L \times q_s/F.S. = \pi \times 0.8 \times 5 \times 8/2.5 = 40.2\ ton$$

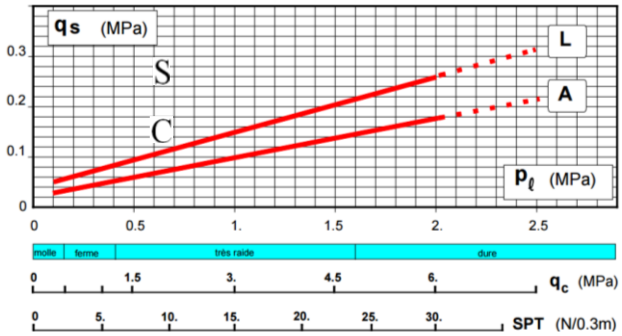
که در آن:

$F_{Geo\text{-}surface}$: ظرفیت باربری جداره ستون جت‌گروت

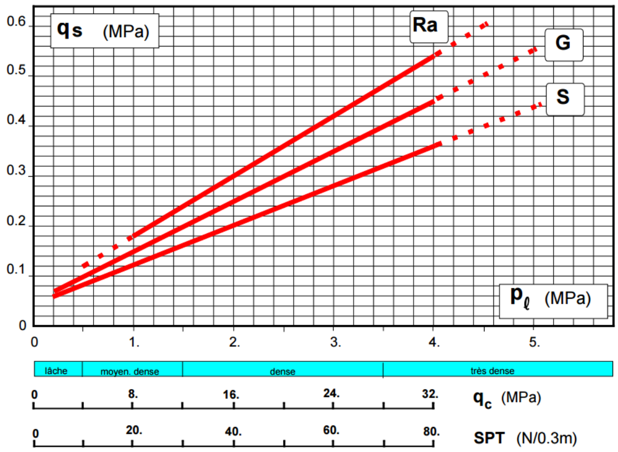
D: قطر ستون جت‌گروت

L: طول ستون جت‌گروت در لایه موردنظر

q_s: چسبندگی بین جدار و خاک اطراف که از نمودارهای ارائه شدهٔ بوستامانته [۱۱] به‌دست می‌آید.



شکل ۱۲. محاسبهٔ q_s برای سیلت و رس [۱۲]



شکل ۱۳. محاسبهٔ q_s برای ماسه، شن و سنگ‌های دگرگونی [۱۱]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.3.1.9]

[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.3.467]

ب) ظرفیت باربری نوک

ظرفیت باربری نوک ستون را می‌توان با استفاده از روابطی که اونیل و ریز [۱۲] ارائه کرده‌اند مطابق زیر محاسبه کرد:

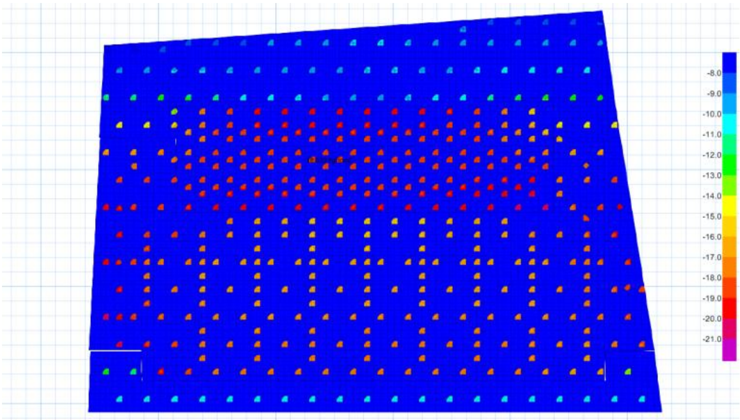
$$F_{Geo-toe} = (\pi \times D^2/4) \times 5.75 N_{60}/F.S. = (\pi \times 0.8^2/4) \times 5.75 \times 30/2.5 = 34.7\ ton$$

که در آن:

$F_{Geo\text{-}toe}$: ظرفیت باربری نوک ستون جت‌گروت

N_{60}: میانگین عدد SPT در فاصلهٔ بین نوک شمع و ۲D زیر نوک شمع

با توجه به روابط 00 ظرفیت باربری هر ستون برابر ۸۰ تن در نظر گرفته شد و طرح بر اساس نتایج جدید مطابق شکل ۱۴ اصلاح شد



شکل ۱۴. **پلان جانمایی نهایی ستون‌های جت‌گروتینگ در طرح اصلاح شده (kg/cm^2)**

نتیجه‌گیری

نظر به نتایج به‌دست‌آمده از بازبینی ابعاد ستون‌ها و همچنین نتایج حاصل از شکست مغزه‌های به‌دست‌آمده از ستون‌های جت‌گروت در پروژهٔ بررسی شده، این موارد به‌منظور بهره‌برداری کارشناسان و محققان در طراحی و پژوهش‌های آتی پیشنهاد می‌شود:

الف) چنان‌که اکثر آیین‌نامه‌ها و پژوهش‌های دیگر توصیه کرده‌اند، برای حصول اطمینان از فرضیات طراحی، مغزه‌گیری از ستون‌های جت‌گروت و کنترل قطر و مقاومت تک‌محوری مخلوط خاک سیمان حاصل ضروری است. برای ارزیابی و نتیجه‌گیری از وضعیت بهسازی، می‌توان از معیارهای موجود و موارد ارائه‌شده در این مقاله استفاده کرد.

ب) میانگین قطر ستون‌های جت‌گروت در ماسهٔ غیراشباع با میانگین عدد نفوذ استاندارد ۲۰ تحت تزریق با فشار ۴۵۰ بار به‌روش تک‌سیالی و چگالی دوغاب ۱۶۰۰ گرم بر لیتر و سرعت چرخش و بالا آمدن نازل به‌ترتیب برابر نیم‌دور بر ثانیه و ۴ سانتی‌متر در هر ۸ ثانیه (۴–۸–۴) برابر ۱ متر است و میانگین قطر ستون‌ها در ماسه سست با میانگین عدد SPT ۱۲ در شرایط تزریق مشابه در زیر تراز آب زیرزمینی (خاک اشباع) حدود ۸۰ سانتی‌متر به‌دست می‌آید.

ج) مقاومت تک‌محوری مغزه‌های به‌دست‌آمده از ستون‌های جت‌گروت در خاک ماسه‌ای سست اشباع (زیر تراز آب زیرزمینی) به‌طور متوسط برابر ۴۰ kg/cm^2 به‌دست آمد که با توجه به اعمال ضریب اطمینان ژئوتکنیکی و سازه‌ای و در نظر گرفتن قطر ۸۰ سانتی‌متر برای ستون‌ها، ظرفیت باربری هر ستون برابر ۸۰ تن به‌دست آمد و بر مبنای آن تصحیحات لازم در طرح اولیه انجام شد.

د) نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهند که با توجه به زمان اجرای کوتاه نسبت به حجم عملیات بهسازی، روش جت‌گروتینگ روشی مناسب و اقتصادی در زمین‌های ماسه‌ای اشباع برای تأمین ظرفیت باربری موردنیاز است و روش نرخ بهسازی در ارزیابی مقاومت تک‌محوری مغزه‌های استخراجی از خاک بهسازی شده و تصحیح ظرفیت باربری ستون‌های جت‌گروت کارایی مناسبی از خود نشان داده است

ه) با توجه به این‌که نتایج حاصل در غیاب هرگونه اثر شرایط خورنده (سولفات، کلراید و غیره) به‌دست آمده است از این رو، پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آتی این اثر نیز بررسی شود.

[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.3.1.9]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.3.467]

منابع

1. 1. Miki G. "Chemical stabilization of sandy soils by grouting in Japan", Proceedings of the 8th ICSMFE, Moscow, Russia, (June 1973) 395-405
2. Nakanishi W. "Method for Forming an Underground Wall Comprising a Plurality of Columns in the Earth and Soil Formation, U.S. Patent 3,800,544 (1974) 8 .
3. Xanthakos P., Abramson L. W., Bruce D. A., "Ground Control and Improvement", New York: John Wiley & Sons, Inc.(1994) 670 .
4. Yahiro T., Yoshida H.,"Induction grouting method utilizing high-speed water jet", Proceedings of the 8th ICSMFE, Moscow, Russia, (June 1973). 402–404.
5. Yahiro T., Yoshida H., Nishi K.,"Soil improvement utilizing a high-speed waterjet and air jet. Proceedings of the 6th International Symposium on Water Jet Technology, Cambridge, United Kingdom, Paper J62, August 30-31 (1974) 397-428.
6. Croce P., Flora A., Modoni G.," jet grouting technology, design and control", London New York: CRC Press, (2014) 302.
7. Yoshitake I., Mitsui T., Yoshikawa T., Ikeda A., Nakagawa K., "An evaluation method of ground improvement by jet grouting", Proceedings of the Japan Society of Civil Engineers735 (2003) 215-220.
8. Sližytė D., Dagys A., Medzvieckas J., Milvydas V., "Using of jet grouting piles reinforced with central bars for low retaining walls", The 10 th International Conference on Modern Building Materials, Structures and Techniques (2010).

9. DIN 4093, "Design of ground improvement: Jet grouting, deep mixing, or grouting. Standard of the Deutsches Institut für Normung", 2012 ed.: Düsseldorf, Germany (2012) 17.
10. JJGA. "Jet Grouting Technology: JSG Method, Column Jet Grouting Method", Technical Information of the Japanese Jet Grouting Association, 13th ed. (English translation), October (2005) 80.
11. Bustamante M. "Les colonnes de jet grouting. Report of the Seminar: Pathologies des Sols et des Foundations", http://www.keller-france.com/rechercheet-developpement/theses-et-publications: 6 p [in French] (2002).
12. FHWA-NHI-10-016. O'Neill M. W., Reese L. C., Drilled shafts: Construction procedures and design methods" (May 2010).