بررسی و مقایسه روش های مقابله با روانگرایی
مطالعه موردی پروژه طرح و توسعه مجتمع بندری شهید رجایی

دانیال یحیی پور
دانشجوی کارشناسی ارشد عمران، مؤسسه آموزش عالی علوم و فناوری آریان، بابل، ایران
yahyapourd@gmail.com

محمد شامخی امیری
استادیار دانشکده عمران، دانشگاه شاهرود، شاهرود، ایران
m_shamekhi@yahoo.com

کلید واژه‌ها: *روانگرایی، روش فرآیند تحلیل سلسله مراتبی، بندر شهید رجایی، بهسازی خاک، تراکم دینامیکی*

چکیده

همواره در پروژه های عمرانی اولین مسأله در مطالعات اولیه، بررسی خاک منطقه می باشد. خاک همواره به دلیل خصوصیات مختلف، رفتارهای متفاوتی از خود بروز می دهد و قبل از اجرای هر پروژه ای، شناسایی خاک پروژه، به ویژه، مطالعه رفتار خاک سازه هایی که در سواحل احداث می گردد، به دلیل احتمال وقوع روانگرایی از اهمیت ویژه ای برخوردار می باشد. بدیهی است که با کنترل و کاهش مخاطرات روانگرایی، می توان با اطمینان بیشتری نسبت به اجرای سازه های ساحلی اقدام نمود. اما برای مقابله با روانگرایی، روش های گوناگونی وجود دارد که هر کدام از آنها مزایا و معایب خاص خودش را دارد. مدیران پروژه، همواره در ابتدای پروژه، با چالش های متفاوتی در خصوص تصمیم گیری روش اجرای پروژه مواجه هستند. یکی از این تصمیمات مهم، روش اجرای بهسازی خاک پروژه برای مقابله با خاک روانگرا می باشد. در این مقاله تلاش گردید تا با معرفی معیارهای مختلف ارزیابی مدیریتی بهسازی خاک، روش بهینه از بین روش های مختلف قابل اجرا برای بهسازی خاک با استفاده از روش فرآیند تحلیل سلسله مراتبی معرفی گردد. پروژه طرح و توسعه مجتمع بندری شهید رجایی به عنوان مطالعه موردی در این مقاله استفاده شد و پس از بررسی و ارزیابی روش های گوناگون، روش تراکم دینامیکی به عنوان گزینه برتر معرفی گردید.

مقدمه

بهسازی خاک شامل تکنیک ها و روش های مختلفی می باشد که در نهایت با اعمال آن، خصوصیات مکانیکی خاک بهبود می یابد و در نتیجه منجر به افزایش مقاومت، کاهش تغییرات حجمی و تأمین رفتار خاصی از خاک می شود.

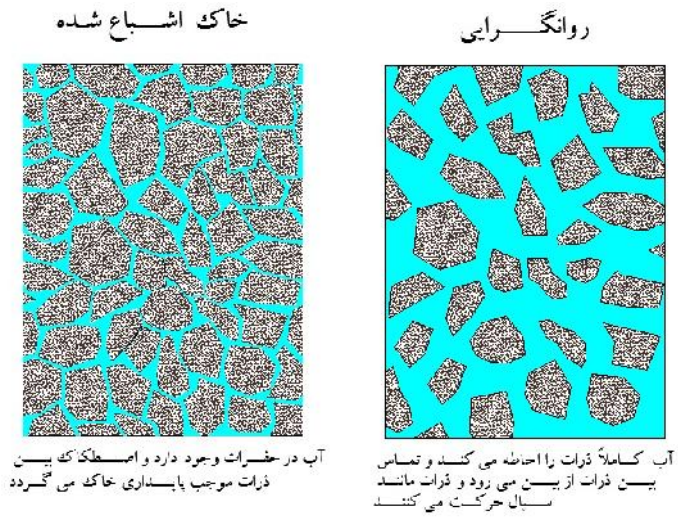
مطالعات و تحقیقات زیادی در زمینه بهسازی خاک انجام گرفته (Elias et al., 2001) و روش های مختلفی ارائه شده است که عمده این روش ها عبارتند از:

حفاری و برداشت و جابجایی و جایگزینی، پایین آوردن سطح آب زیرزمینی و زهکشی، پیش فشردگی از طریق پیش بارگذاری، ستون های سنگی با ستون های تثبیت شده در خاک، تراکم دینامیکی، تراکم ارتعاشی، میله مرتعش، تراکم انفجاری، تزریق نفوذی، تزریق تراکمی، تزریق فشاری، اختلاط عمیق، شمع های تراکمی، میخ گذاری، مهارگذاری، میکروپایل ها یا ریزشمع ها، الکترو اسمز، خاکریز حائل، تثبیت، تسلیح خاک با استفاده از ژئوسنتتیک ها، انجماد

هر گاه ارتعاشات یا فشار آب درون توده خاک باعث شود که ذرات خاک تماسشان را با یکدیگر از دست بدهند، (شکل ۱) خاک به مانند یک مایع روان شده که به آن روانگرایی می گویند.

در صورتیکه سه شرط رسوبات یا خاکریزهای دانه ای و سست، اشباع بوسیله آب زیرزمینی و لرزش نیرومند به طور همزمان فراهم گردد، پدیده روانگرایی اتفاق می افتد. بنابراین، برای مقابله با آن، بایستی یکی از عوامل سه گانه را حذف نمود. طبیعی است که زلزله اتفاق می افتد و

راهی برای جلوگیری از آن وجود ندارد، بنابراین باید یا شرایط اشباع را از بین برد یا اینکه راهکاری برای خاک پیدا نمود.



شکل ۱: شکل شماتیک ذرات ماسه در حالت های اشباع و روان شده

پروژه طرح و توسعه مجتمع بندری شهید رجایی

بندر شهید رجایی در ساحل جنوبی ایران در فاصله بیست کیلومتری جنوب غربی شهر بندرعباس مرکز استان هرمزگان با مختصات طول جغرافیایی ۵۶ درجه و ۳ دقیقه شرقی و عرض جغرافیایی ۲۷ درجه و ۵ دقیقه شمالی قرار گرفته است. این بندر از نظر موقعیت دریایی در دهانه ورودی خلیج فارس، ابتدای تنگه هرمز و شمال جزیره قشم واقع شده است. فاصله این بندر تا تهران ۱۵۶۳ کیلومتر و تا فرودگاه بندرعباس ۴۰ کیلومتر می باشد. بندر شهید رجایی با جاده، راه آهن و خطوط هوایی به تهران و سایر نقاط ایران و جهان مرتبط می شود.

طرح توسعه بندر شهید رجایی برای دستیابی به ظرفیت انجام سالانه حداقل ۶.۳ میلیون TEU عملیات کانتینری با احداث ۲ هزار و ۸۷۰ متر اسکله به عمق بین ۱۶ تا ۱۷ متر و محوطه‌های مربوطه به مساحت ۱۴۰ هکتار به منظور فراهم ساختن زمینه پذیرش کشتی‌های نسل ششم کانتینری طی ۲ فاز در دستور کار وزارت راه و ترابری و سازمان بنادر و دریانوردی قرار گرفت. عملیات اجرایی این طرح در سال ۸۳ آغاز و فاز اول آن به مرحله بهره‌برداری رسید.

بر اساس پروفیل های بدست آمده در نتیجه مطالعات ژئوتکنیکی در این پروژه، تعداد پنج لایه زمین شناسی با مشخصات جدول ۱ را نشان می داد: (Nouri et al., 2008)

جدول ۱: مشخصات زمین شناسی لایه های خاک پروژه SRPCD

لایه خاک	نوع خاک	شرح
لایه اول	خاک موجود و خاک پرکننده	ضخامت ۱ تا ۴ متر- عدد *SPT* به طور متوسط: ۲۳ – ریز دانه: ۲۰ درصد
لایه دوم	ماسه فوقانی	ضخامت ۵ تا ۷ متر- عدد *CPT* به طور متوسط: ۱۰ *Mpa* – ریز دانه: کمتر از ۳۰ درصد
لایه سوم	رس و سیلت فوقانی	ضخامت ۹ تا ۱۳ متر- عدد *SPT* به طور متوسط: ۱۶ - عدد *CPT* به طور متوسط: ۱.۵ تا ۲ *Mpa*
لایه چهارم	ماسه تحتانی	ضخامت ۹ تا ۱۱ متر- عدد *SPT* به طور متوسط: بیش از ۵۰
لایه پنجم	رس و سیلت تحتانی	عدد *SPT* رس به طور متوسط: ۴۲ و عدد *SPT* سیلت: بیش از ۵۰

بر اساس مطالعات صورت گرفته، لایه های روانگرا در قسمت های مختلف پروژه در اعماق CD ۲- تا CD ۷.۵- می باشد. با توجه به اینکه تراز طبیعی زمین به طور متوسط در حدود CD ۴.۵+ قرار داشت، لذا لایه های روانگرا در اعماق ۶.۵ تا ۱۲ متری از سطح زمین قرار داشتند. با توجه به استدلال های مهندسی صورت گرفته، حداکثر عمق مورد نیاز برای بهسازی زمین در مقابله با روانگرایی به میزان ۸ متر تشخیص داده شد. (Jalili and Nouri, 2007).

بررسی روش های قابل اجرا

بیشتر روش هایی که در بالا نام برده شد، می تواند برای مقابله با روانگرایی به کار برده شود اما برای مقابله با روانگرایی عمیق و نیمه، هنگامی که لایه های روانگرا در عمق زمین باشند، تنها می توان از روش های تراکم ارتعاشی، میله مرتعش، ستون های سنگی، تراکم دینامیکی، تراکم انفجاری، زهکشی، اختلاط عمیق، تزریق نفوذی، تزریق تراکمی و شمع های تراکمی استفاده نمود (Enson, 1999). اما با عنایت به بالا بودن سطح آب زیرزمینی به دلیل مجاورت منطقه با دریا، اجرای روش زهکشی امکان پذیر نمی باشد. لذا سایر روش های نامبرده شده، مورد ارزیابی قرار می گیرد. بدین منظور مقایسه ای بین روش های قابل اجرا بر اساس نوع خاک، عمق بهسازی در دسترس، تجربیات داخلی و خارجی، مزایا و معایب، نوع تجهیزات مورد نیاز و حضور پیمانکاران آماده به کار، هزینه و زمان اجرا انجام گردید که ماحصل آن در جدول ۲ نشان داده شده است.

جدول ۲: مقایسه مدیریتی روش های بهسازی قابل اجرا در پروژه SRPCD

روش بهسازی	نوع خاک	تأمین عمق مورد نیاز بهسازی	تجربیات خارجی	تجربیات داخلی	تجهیزات مورد نیاز	در دسترس بودن پیمانکاران	زمان اجرا	هزینه اجرا
تراکم ارتعاشی	√	√	خیلی زیاد	متوسط	تجهیزات خاص	خیلی خوب	خیلی خوب	متوسط
میله مرتعش	√	√	خیلی زیاد	--	تجهیزات خاص	--	خوب	نسبتاً زیاد
ستون های سنگی	√	√	خیلی زیاد	نسبتاً زیاد	تجهیزات خاص	خیلی خوب	خیلی خوب	نسبتاً زیاد
تراکم دینامیکی	√	√	زیاد	زیاد	تجهیزات معمولی	عالی	خوب	پایین
تراکم انفجاری	√	√	زیاد	--	تجهیزات معمولی	--	خوب	پایین
اختلاط عمیق	√	√	متوسط	--	تجهیزات خاص	--	نسبتاً خوب	خیلی زیاد
تزریق نفوذی	√	√	زیاد	زیاد	تجهیزات معمولی	خیلی خوب	پایین	زیاد
تزریق تراکمی	√	√	کم	--	تجهیزات معمولی	--	خوب	نسبتاً پایین
شمع های تراکمی	√	√	خیلی زیاد	کم	تجهیزات معمولی	خیلی خوب	خیلی خوب	نسبتاً زیاد

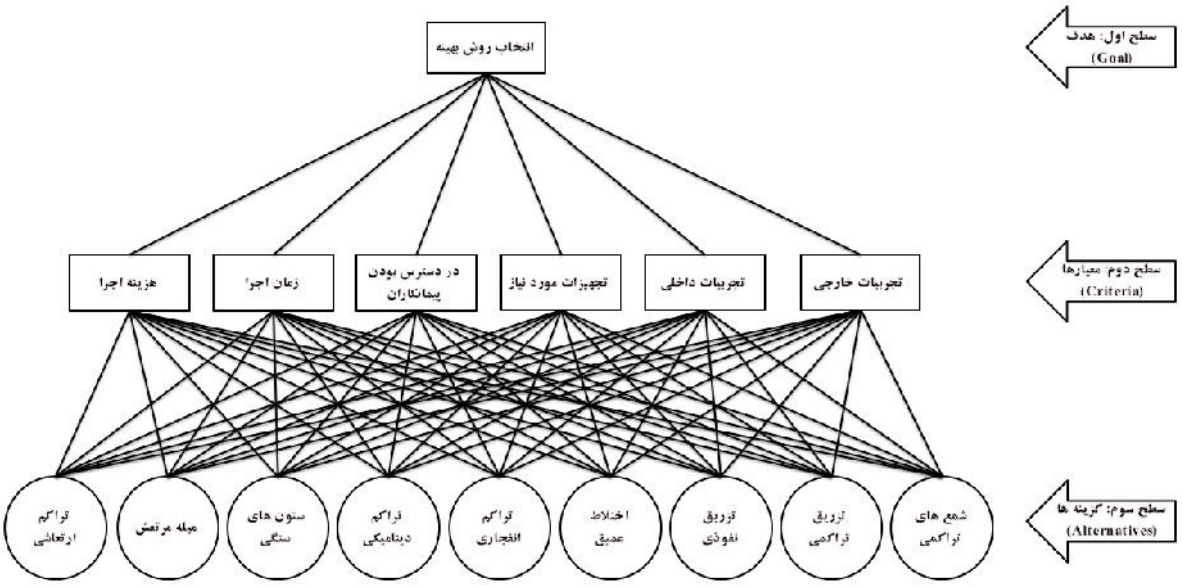
انتخاب روش بهینه بهسازی خاک

با توجه به موارد گفته شده و جمع بندی اطلاعات بدست آمده، بهترین روش بهسازی در پروژه طرح و توسعه مجتمع بندری شهید رجایی را می توان از بین گزینه های ممکن انتخاب کرد. بهترین راه برای انتخاب روش بهینه از بین روش های بالا، امتیاز دهی هر یک از روش های نه گانه می باشد. لذا برای انجام چنین کاری باید از روش های ارزیابی معیارهای چند گانه استفاده نمود.

یکی از بهترین و معروف ترین روش های ارزیابی معیارهای چندگانه، روش فرآیند تحلیل سلسله مراتبی (AHP) می باشد که اولین بار توسط توماس ال ساعتی عراقی الاصل در دهه۱۹۷۰ ابداع گردید. این تکنیک امکان فرموله کردن مسأله را به صورت سلسله مراتبی فراهم می کند و امکان در نظر گرفتن معیارهای مختلف کمی و کیفی را در مسأله دارد. به اختصار، اساس کار این روش به این ترتیب می باشد که نخست درختچه سلسله مراتب شکل می گیرد و سپس با تشکیل ماتریس و مقایسه های دو دویی، وزن معیارهای ارزیابی و همچنین وزن گزینه های تصمیم گیری بدست می آید و در نهایت گزینه نهایی که بیشترین امتیاز را نسبت به سایر گزینه ها دارد به عنوان گزینه برتر تصمیم گیری معرفی می گردد.

ترسیم سلسله مراتب

با توجه به موارد بیان شده، برای رسم سلسله مراتب مطابق شکل ۲، سه سطح تعریف می گردد. سطح اول هدف بوده که در این پروژه، روش بهینه برای بهسازی خاک می باشد. سطح دوم معیارهای ارزیابی می باشد که بر اساس جدول ۱، شامل نوع خاک، تأمین عمق مورد نیاز بهسازی، تجربیات داخلی و خارجی، تجهیزات مورد نیاز، در دسترس بودن پیمانکاران، هزینه و زمان اجرا می باشد. از آنجایی که دو عامل نوع خاک و تأمین عمق مورد نیاز بهسازی در کلیه روش های نه گانه بهسازی قابلیت اجرا را دارد، لذا دو عامل نامبرده حذف گردیده و سایر عوامل به عنوان معیارهای ارزیابی در نظر گرفته می شود. سطح سوم شامل گزینه های تصمیم گیری می باشد که در این پروژه، روش های نه گانه بهسازی خاک می باشد.



شکل ۲: سلسله مراتب

محاسبه وزن معیارها

در این مرحله جهت تعیین وزن نهایی معیار ها از روش تطبیقی دو دویی استفاده شده که در آن دو معیار با همدیگر مقایسه و بر اساس میزان اهمیت آنها و با توجه به هدف تصمیم گیرندگان از تحلیل, ارزش های متفاوت می گیرند.

جدول ۳: مقیاس نه درجه ساعتی (Saaty, 2008)

درجه اهمیت	تعریف	توضیحات
۱	اهمیت یکسان	دو گزینه به طور مساوی سهم دارند.
۲	کم و اندک	
۳	نسبتاً مهم	یک گزینه نسبت به گزینه دیگر کمی مهم تر است.
۴	نسبتاً زیاد	
۵	اهمیت زیاد	یک گزینه نسبت به گزینه دیگر اهمیت بیشتری دارد.
۶	اهمیت زیادتر	
۷	اهمیت خیلی	یک گزینه نسبت به گزینه دیگر اهمیت خیلی بیشتری دارد و در عمل ثابت شده است.
۸	خیلی خیلی زیاد	
۹	بی نهایت مهم	مدارک و شواهد نشان داده است که یک گزینه نسبت به دیگری بی نهایت مهم است.

بدین منظور با تشکیل ماتریس معیارها (جدول ۴)، هر یک از آرایه های ماتریس به صورت دو دویی با استفاده از جدول ۳ که به مقیاس نه درجه ساعتی معروف است، امتیاز بندی می گردد و در نهایت وزن معیارها بدست می آید. در این ماتریس برای جلوگیری از آشفتگی، معیار های ارزیابی به صورت حروف انگلیسی به شرح ذیل نشان داده شده است:

A: هزینه اجرا

B: زمان اجرا

C: در دسترس بودن پیمانکاران

D: تجهیزات مورد نیاز

E: تجربیات داخلی

F: تجربیات خارجی

جدول ۴: ماتریس مقایسه دو دویی نسبت به هدف

	A	B	C	D	E	F	وزن معیار
A	۱	۳	۵	۵	۷	۸	۰.۴۵۷۲
B	۱/۳	۱	۳	۳	۵	۶	۰.۲۴۱۰
C	۱/۵	۱/۳	۱	۱	۳	۴	۰.۱۰۹۷
D	۱/۵	۱/۳	۱	۱	۳	۴	۰.۱۰۹۷
E	۱/۷	۱/۵	۱/۳	۱/۳	۱	۲	۰.۰۴۹
F	۱/۸	۱/۶	۱/۴	۱/۴	۱/۲	۱	۰.۰۳۳۵

همانطوریکه ملاحظه می گردد عوامل هزینه اجرا و تجربیات خارجی به ترتیب با درصد های وزنی حدود ۴۶ و ۳ درصد، بیشترین و کمترین تأثیر را در انتخاب روش بهینه خواهند داشت.

وزن گزینه ها نسبت به معیارها

برای محاسبه وزن گزینه ها نسبت به معیارها، باید همانند محاسبه وزن معیار عمل نمود. لذا برای بدست آوردن آن، با توجه به جدول ۳، ماتریس گزینه ها در خصوص هر یک از معیار ها تشکیل گردیده و وزن هر گزینه نسبت به آن معیار محاسبه می گردد که نتایج محاسبات در جدول ۵ نشان داده شده است. لازم به ذکر است که مقایسه های دو دویی بر اساس اطلاعات موجود در استاندارد اداره بزرگراه های ایالت متحده (FHWA) بدست آمده است.

جدول ۵: وزن گزینه های تصمیم گیری نسبت به معیارهای ارزیابی شش گانه

	هزینه اجرا	زمان اجرا	در دسترس بودن پیمانکاران	تجهیزات مورد نیاز	تجربیات داخلی	تجربیات خارجی
تراکم ارتعاشی	۰.۰۹۶۸	۰.۲۰۷۹	۰.۱۵۷۶	۰.۰۵۷۱	۰.۱۱۵۸	۰.۱۸۳۷
میله مرتعش	۰.۰۵۹۹	۰.۰۸۰۵	۰.۰۱۹۸	۰.۰۵۷۱	۰.۰۱۸۴	۰.۱۸۳۷
ستون های سنگی	۰.۰۵۹۹	۰.۲۰۷۹	۰.۱۵۷۶	۰.۰۵۷۱	۰.۱۷۵۳	۰.۱۸۳۷
تراکم دینامیکی	۰.۲۱۵۶	۰.۰۸۰۵	۰.۲۹۰۲	۰.۱۶۰۵	۰.۲۷۷۸	۰.۰۷۱۲
تراکم انفجاری	۰.۳۰۳۱	۰.۰۸۰۵	۰.۰۱۹۸	۰.۰۲۶۴	۰.۰۱۸۴	۰.۰۷۱۲
اختلاط عمیق	۰.۰۱۹۸	۰.۰۳۴۸	۰.۰۱۹۸	۰.۱۶۰۵	۰.۰۱۸۴	۰.۰۳۲۹
تزریق نفوذی	۰.۰۳۷۸	۰.۰۱۹۴	۰.۱۵۷۶	۰.۱۶۰۵	۰.۲۷۷۸	۰.۰۷۱۲
تزریق تراکمی	۰.۱۴۷۱	۰.۰۸۰۵	۰.۰۱۹۸	۰.۱۶۰۵	۰.۰۱۸۴	۰.۰۱۸۷
شمع های تراکمی	۰.۰۵۹۹	۰.۲۰۷۹	۰.۱۵۷۶	۰.۱۶۰۵	۰.۰۷۹۶	۰.۱۸۳۷

محاسبه وزن گزینه ها و انتخاب روش بهینه

با توجه به محاسبات انجام گرفته و مشخص شدن وزن معیارها و وزن هر گزینه نسبت به معیار ها، با استفاده از فرمول زیر، وزن هر گزینه بدست می آید.

$$\text{وزن نهایی گزینه } i = \sum_{K=1}^{n} w_k w_{ki} \qquad (1)$$

که در آن W_K؛ وزن معیار k ، n؛ تعداد معیارهای ارزیابی و W_{ki}؛ وزن گزینه i نسبت به معیار k می باشد.

بنابراین با قرار دادن نتایج بدست آمده در معادله ۱، وزن گزینه ها بدست می آید. خلاصه نتایج بدست آمده در جدول ۶ نشان داده شده است. در این جدول گزینه ها به ترتیب امتیازهای کسب شده مرتب گردیده اند. همانطوریکه ملاحظه می گردد روش تراکم دینامیکی با کسب بیشترین امتیاز (۰.۱۸۳۴) می تواند به عنوان گزینه نخست برای تصمیم گیری روش بهینه بهسازی خاک معرفی گردد.

جدول ۶: نتایج وزن گزینه ها با استفاده از روش فرآیند تحلیل سلسله مراتبی (AHP)

رتبه	گزینه	امتیاز
۱	تراکم دینامیکی	۰.۱۸۳۴
۲	تراکم انفجاری	۰.۱۸۱۰
۳	تراکم ارتعاشی	۰.۱۲۹۷
۴	شمع های تراکمی	۰.۱۲۲۴
۵	ستون های سنگی	۰.۱۱۵۸
۶	تزریق تراکمی	۰.۱۰۸۰
۷	تزریق نفوذی	۰.۰۷۲۹
۸	میله مرتعش	۰.۰۶۲۳
۹	اختلاط عمیق	۰.۰۲۴۵
جمع		۱

نتیجه گیری

در مناطق ساحلی به دلیل بالا بودن سطح آب زیرزمینی، اصلی ترین خطر در صورت وقوع زلزله، افزایش فشار آب منفذی و در نتیجه آن، ایجاد روانگرایی در لایه های زمین می باشد. لذا با توجه به اینکه پدیده روانگرایی یکی از عوامل اصلی خرابی سازه ها در مناطق با خاک دانه ای سست و اشباع است، انجام بهسازی خاک با استفاده از روش های مناسب الزامی است. لذا با توجه به موارد گفته شده، نتایج زیر بدست می آید:

- روش های تراکم ارتعاشی، میله مرتعش، ستون های سنگی، تراکم دینامیکی، تراکم انفجاری، زهکشی، اختلاط عمیق، تزریق نفوذی، تزریق تراکمی و شمع های تراکمی به عنوان روش های بهسازی قابل اجرا برای مقابله با روانگرایی عمیق و نیمه عمیق می باشند.
- روش زهکشی در مناطق ساحلی به دلیل بالا بودن سطح آب زیرزمینی قابل اجرا نمی باشد.
- روش فرآیند تحلیل سلسله مراتبی می تواند به عنوان روش قابل قبول و مطمئنی برای انتخاب روش بهسازی در پروژه ها به کار رود.
- بر اساس روش فرآیند تحلیل سلسله مراتبی، هزینه اجرای پروژه دارای بیشترین تأثیر در انتخاب روش بهینه می باشد.
- روش های تراکم دینامیکی و تراکم انفجاری در مقایسه با سایر روش های بهسازی قابل اجرا در این منطقه، از هزینه اجرای کمتری برخوردار می باشد و مقرون به صرفه تر می باشد.
- روش های تراکم ارتعاشی، ستون های سنگی و شمع های تراکمی از سرعت اجرای بالایی برخوردار می باشند.
- بر اساس روش فرآیند تحلیل سلسله مراتب، روش تراکم دینامیکی بهترین گزینه در بین گزینه های بهسازی خاک در پروژه طرح و توسعه مجتمع بندری شهید رجایی می باشد.
- وسعت زیاد منطقه استفاده از روش های سریع بهسازی را ایجاب می کند و این سرعت بالا در تراکم دینامیکی وجود دارد.
- مزیت دیگر روش تراکم دینامیکی، عدم نیاز به تجهیزات خاص می باشد. چون که اجرای تراکم دینامیکی تنها مستلزم به کارگیری جراثقالی با ظرفیت مشخص و کوبه هایی با وزن معین می باشد.
- با توجه به حضور پیمانکاران تراکم دینامیکی در منطقه به دلیل اجرای پروژه های مشابه، هزینه اجرای تراکم دینامیکی به دلیل حذف هزینه های حمل و نقل تجهیزات و ماشین آلات پیمانکاران کاملاً اقتصادی می باشد.
- با عنایت به اینکه عمق مورد نیاز برای بهسازی حدود ۸ متر می باشد و در دسترس بودن فضای کافی بدون هیچگونه معارض و همچنین عدم مجاورت سازه های حساس در مقابل ارتعاش ناشی از اجرای تراکم، محدودیت های استفاده از روش تراکم دینامیکی در این پروژه وجود نداشته و اجرای آن بلامانع می باشد.

مراجع

Elias V, Welsh J, Warren J and Lukas R (2001) Ground Improvement Technical Summaries, US Department of Transportation, Federal Highway Administration, FHWA-SA-98-086R, Vol. 1 & 2

Enson CF (1999) Guidelines on Ground Improvement for Structures and Facilities" Engineer Technical Letter 1110-1-185, U.S. Army Corps of Engineers, Chapter 3 & 4, pp. 47-83

Jalili M and Nouri H (2007) Soil Improvement behind Quay Walls, Sahel Consultant Engineers, Tehran, pp. 55

Nouri HR, Ali-Elahi H, Jalili M and Seyedi Hosseininia E (2008) Evaluation of Empirical Relationships for Dynamic Compaction in liquefiable Reclaimed Silty Sand Layers using Pre/Post Cone Penetration Tests, 6th International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering, Arlington, VA

Saaty TL (2008) Decision making with the analytic hierarchy process, Int. J. Sciences, Vol. 1, No. 1