بررسی دو روش تراکم دینامیکی و اختلاط عمیق در بهسازی بستر سواحل

میلاد ندیمی[1]، محمدحسن کرمی[2]، داوود یحیی محمودی[3]

1- دانشجوی کارشناسی ارشد ژئوتکنیک، دانشگاه شاهد تهران

2- عضو هیئت علمی دانشگاه شاهد، گروه مهندسی عمران

3- کارشناسی ارشد ترافیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب

1- Email: miladnadimi2000@gmail.com
2- Email: mkarami@shahed.ac.ir
3- Email: davoodmahmoodi110@gmail.com

چکیده

امروزه تراکم دینامیکی به عنوان روشی مناسب جهت بهسازی عمیق خاک‌های سست مطرح است. در این روش ضربات متوالی کوبه‌ای به وزن 10 تا 40 تن که از ارتفاع 10 تا 30 متر رهاشده باعث تراکم عمیق توده خاک می‌گردد.

روش اختلاط عمیق به عنوان یکی از روش‌های موثر در تقویت پی‌ها و زمین‌های نامناسب جهت ساخت‌وساز در مهندسی ژئوتکنیک مورد توجه ویژه‌ای قرار گرفته است. محدودیت‌های اقتصادی، زمانی و یا محیطی گاه سبب می‌شود روش‌هایی مانند پیش بارگذاری یا دینامیکی قابل‌استفاده نباشند.

در این مقاله ابتدا به شناسایی دو روش بهسازی تراکم دینامیکی و اختلاط عمیق پرداخته می‌شود. پس از بیان هر روش به بررسی عوامل تأثیرگذار بر روش‌های مورد مطالعه پرداخته می‌شود، سپس با بیان روند اجرا، دامنه کاربرد و نتایج حاصل از هر روش، میزان بهسازی بستر سواحل با استفاده از روش‌های مورد نظر با توجه به مشخصات زمین بررسی می‌شود.

کلمات کلیدی: تراکم دینامیکی، اختلاط عمیق، بهسازی، سواحل

1. مقدمه

روش تراکم دینامیکی به روشی اطلاق می‌گردد که در آن با استفاده از یک وزنه سنگین که از ارتفاع مشخصی بر روی خاک رها می‌گردد، با کاهش فضای خالی بین دانه‌های خاک، خاک متراکم خواهد شد. این روش دارای کاربردهای زیادی از جمله استفاده به جهت کاهش نشست پی‌های سطحی و افزایش ظرفیت باربری آن‌ها هست.

پارامترهای مهم ژئوتکنیکی که نقش تعیین‌کننده در استفاده از این روش دارند شامل طبقه‌بندی خاک، درجه اشباع و نفوذپذیری و طول مسیر زهکشی است.

روش اختلاط عمیق در خاک به روشی اطلاق می‌گردد که در آن خاک سست موجود در محل به صورت برجا توسط بازوهایی با مواد افزودنی پایدارکننده نظیر سیمان ،آهک ،خاکستر بادی و یا سایر مواد دیگر ترکیب می‌گردد و باعث بهبود خصوصیات مقاومتی خاک می‌گردد. حاصل این عمل تشکیل ستون‌هایی با خواص مکانیکی و فیزیکی مناسب تر از خاک محل است.

پارامترهای مهم ژئوتکنیکی که نقش تعیین‌کننده در استفاده از این روش دارند شامل عمق، قطر، چسبندگی، هندسه و ضریب نفوذپذیری ستون‌های اختلاط عمیق و مقدار ماده‌ی افزودنی به ستون‌ها است.

2. شرایط و مشخصات خاک سواحل شمال و جنوب کشور برای بهسازی

خاک سواحل جنوب کشور بیشتر رس با چسبندگی بالا یا سنگ مارن و همچنین قلوه‌سنگ همراه با شن و ماسه است، که با توجه به این مشخصات روش تراکم دینامیکی بهتر از سایر روش‌ها برای بهسازی این مناطق است.

خاک سواحل شمال کشور بیشتر ماسه سیلتی با عمق آب زیرزمینی نزدیک به سطح زمین (حدود 2 متر) است، که با توجه به این مشخصات روش اختلاط عمیق برای بهسازی این مناطق نسبت به سایر روش‌های بهسازی برتری دارد.

3.تراکم دینامیکی

بهسازی به روش تراکم دینامیکی شامل سقوط وزنه‌ای سنگین از ارتفاع بر روی سطح زمین می‌باشد (شکل 1). با این کار می‌توان تا عمق 30 متری از سطح زمین را متراکم کرد. از این روش می‌توان برای متراکم کردن خاکریزهای سنگی، خاک‌های رمبنده، ماسه‌های سست و ... استفاده کرد. این روش در مناطق شهری به دلیل ایجاد سر و صدای زیاد و ارتعاش‌های شدید که ممکن است به ساختمان‌ها آسیب بزند استفاده نمی‌گردد.

شکل 1: تراکم دینامیکی

3–1 مطالعات اولیه تراکم دینامیکی:

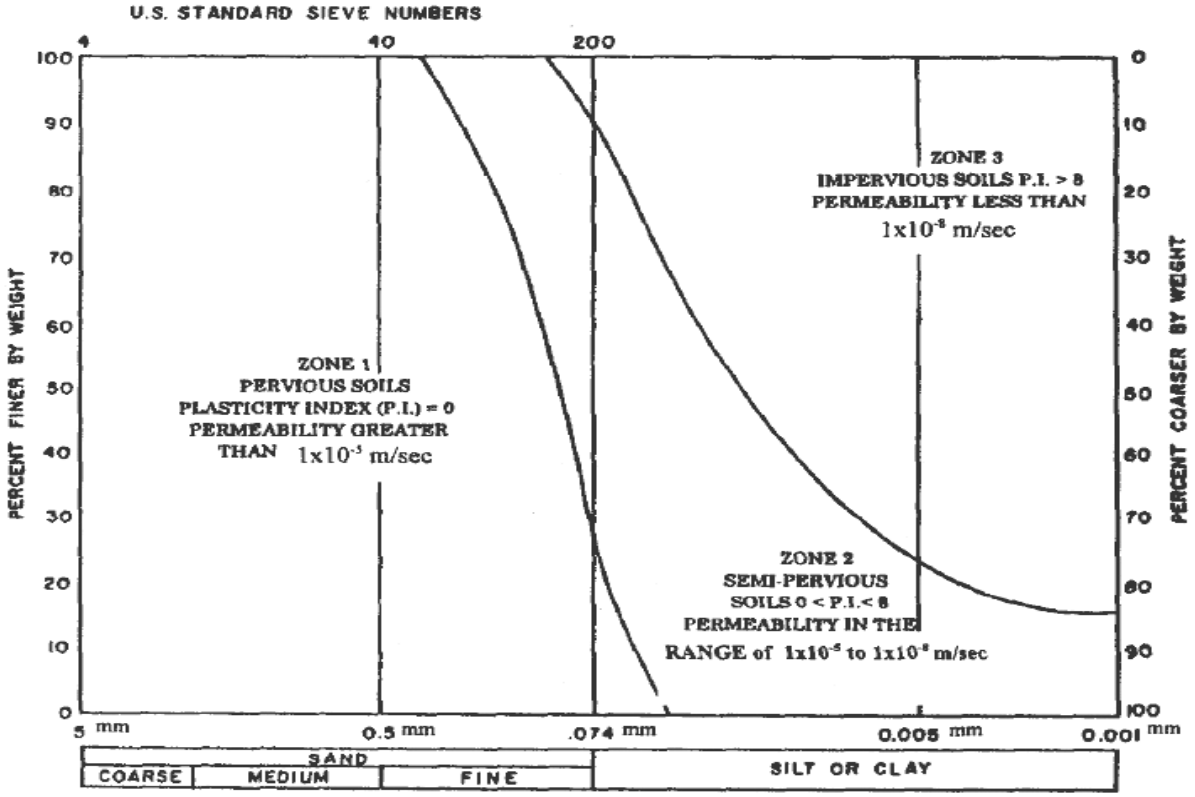
قبل از اجرای عملیات تراکم دینامیکی در یک ناحیه، لازم است لایه‌بندی و جنس لایه‌های تحت تراکم شناسایی گردد. این بررسی‌ها عموماً شامل موارد زیر است:

- حفر گمانه و چاهک‌های اکتشافی: برای توصیف وضعیت لایه‌بندی زمین در محل طرح و تعیین وضعیت آب زیرزمینی
- انجام آزمایش‌های برجا، اخذ نمونه های دست خورده و دست نخورده و انجام آزمایش‌های آزمایشگاهی

برای مطالعه اولیه جهت ارزیابی کارایی روش تراکم دینامیکی در یک پروژه مشخص بررسی عوامل زیر ضروری است. این عوامل به ترتیبی که باید بررسی گردند، آورده شده‌اند. به هر حال با توجه به شرایط پروژه و نوع خاک ممکن است برخی عوامل حذف شوند درحالی‌که برخی دیگر به اطلاعات بیشتری نیاز داشته و یا با دقت بیشتری برآورد گردند. این عوامل عبارت‌اند از:

- طبقه‌بندی نوع خاک
- بررسی محدودیت‌های محل
- تعیین نیازهای طراحی
- برآورد هزینه‌ها

برای بررسی کمی مناسب بودن روش تراکم دینامیکی با توجه به نوع خاک، می‌توان از نمودار طبقه‌بندی خاک‌ها بر حسب توزیع دانه‌بندی که توسط FHWA ارائه شده است، استفاده کرد (شکل 2).



شکل 2 : نمودار طبقه‌بندی خاک‌ها بر حسب توزیع دانه‌بندی

جرم کوبنده‌هایی که برای تراکم دینامیکی استفاده می‌شود ممکن است از یک تن تا صد تن تغییر کند. در مواردی ارتفاع سقوط تا چهل متر به‌کاربرده شده است. در عمل وزنه‌های دو تن تا بیست تن و با ارتفاع سقوط پنج متر تا بیست متر متداول است. کوبنده‌ها در پلان عموماً مربع یا دایره هستند و بسته به وزن مورد نیاز در مصالح موجود ابعادشان به چند متر هم می‌رسد.

عمق موثر تراکم در این روش معمولاً 10 الی 35 فوت است. اگر به صورت اصولی این کار انجام شود ظرفیت باربری پی را می‌توان تا 3000 پوند بر فوت مربع با نشست قابل‌قبول گسترش داد.

دریک محل، تراکم باید تا چند مرحله مجزا با فاصله زمانی صورت گیرد تا فرصت کافی برای محو فشار حفره‌ای اضافی ایجادشده داشته باشد.

3–2 نتایج بهسازی روش تراکم دینامیکی:

- کاهش نشست پذیری
- افزایش ظرفیت باربری
- کاهش پتانسیل روانگرایی
- از بین بردن حفرات بزرگ زیرسطحی
- همگن‌سازی توده‌های ناهمگن
- پایین آوردن تراز نهایی خاکریزها

نشست کلی سطح زمین ناشی از عملیات کوبش به شرایط اولیه توده خاک بستگی دارد (جدول 1).

جدول 1 : نشست حاصل از تراکم دینامیکی

نوع مصالح	درصد نشست نسبت به ضخامت لایه
رسهای طبیعی	۱ تا ۳
خاکریزهای رسی	۳ تا ۵
ماسه‌های طبیعی	۳ تا ۱۰
خاکریزهای دانه‌ای	۵ تا ۱۵
مدفنهای زباله و لایه‌های خاک آلی	۷ تا ۲۰

3–3 آسیب‌های ناشی از تراکم دینامیکی

3–3–1 ارتعاشات ناشی از کوبش

برای محاسبه دامنه ارتعاشات ناشی از کوبش از پارامتر سرعت پیک ذرات (PPV) استفاده می‌شود، که از رابطه 1 به دست می‌آید:

$$PPV \le 70\left(\frac{\sqrt{WH}}{d}\right)^{1.4} \qquad (1)$$

که در این رابطه :

PPV : سرعت اوج ذرات بر حسب میلی‌متر بر ثانیه

d : فاصله از محل برخورد کوبه با زمین بر حسب متر

H : ارتفاع سقوط کوبه بر حسب متر

W : وزن کوبه بر حسب تن

با توجه به جدول 2 اثرات نامطلوب ناشی از کوبش را مشخص می‌کنند.

جدول 2 : اثرات نامطلوب ارتعاشات ناشی از کوبش

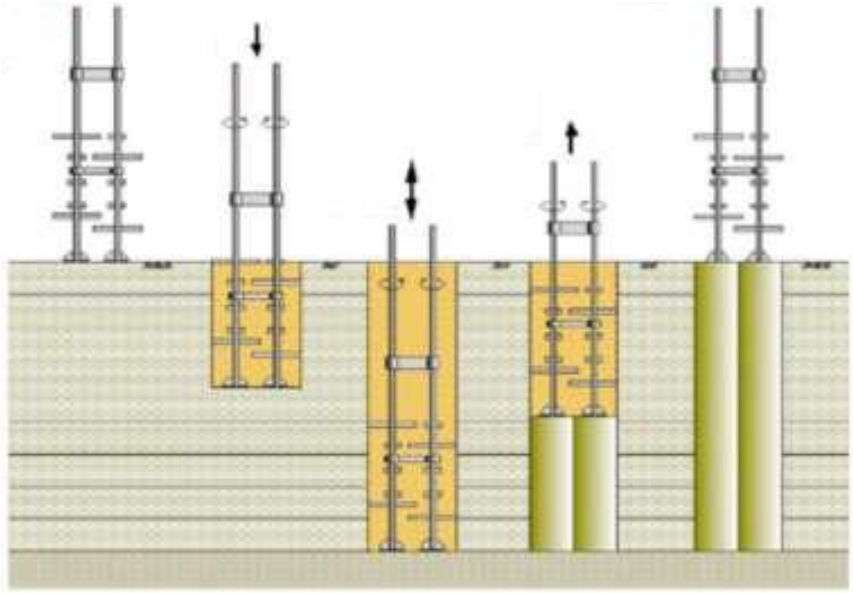
سرعت اوج ذرات (میلیمتر بر ثانیه)	اثرات نامطلوب ارتعاشات ناشی از کوبش
کمتر از ۰/۸	بعضی از انسانها درک می‌کنند.
بین ۰/۸ و ۲/۵	بطور مشخص قابل درک است.
۲/۵	حد مزاحمت برای انسانها
بین ۲/۵ تا ۸/۰	احساس نگرانی
۱۰	آسیبهای جزئی معماری
بیشتر از ۱۳	ایجاد ترک در دیوارهای اندود شده
بیشتر از ۱۹	ایجاد ترک در دیوارهای پیش‌ساخته
٤٠	آسیبهای سازه‌ای

3-3-2 تغییر مکان جانبی

- در حین کوبش سنگین تغییر مکان‌های جانبی در توده مصالح رخ می‌دهد که قسمتی از آن به صورت تغییر شکل دائمی در خاک باقی می‌ماند.
- حداکثر تغییر مکان جانبی معمولاً در اعماقی رخ می‌دهد که حداکثر میزان تراکم بر اثر کوبش سنگین در آن ایجاد می‌شود.
- روش مشخصی برای پیش‌بینی مقادیر این تغییر مکان‌ها وجود ندارد.
- اگر سازه‌ها یا تأسیسات خطی مانند جاده، خط آهن، لوله‌های مدفون در زمین و ... از نزدیکی نقطه پرتاب عبور کند، باید احتمال تغییر مکان‌های جانبی دائمی را مد نظر داشت.

4.اختلاط عمیق

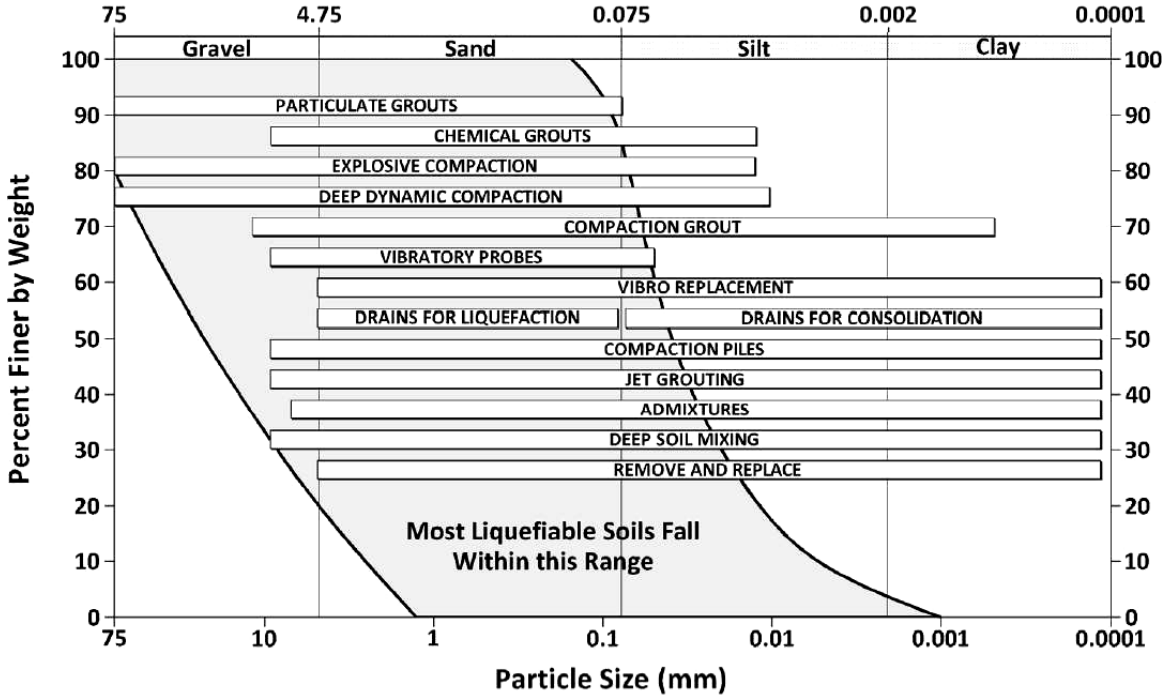
اختلاط خاک در عمق روشی است که در آن مواد پایدارکننده‌ای نظیر سیمان یا آهک با استفاده از یک حفار و به صورت مکانیکی با خاک مخلوط می‌گردند (شکل 3). پس از رسیدن مته‌های حفاری به عمق مورد نظر، عمل تزریق آغاز می‌شود و همزمان با بیرون کشیدن مته‌ها از داخل خاک، به وسیله تیغه‌های اختلاط، ترکیبی از خاک و مواد افزودنی به وجود می‌آید. فرآیند اختلاط خاک موجب تولید ستون یکنواختی با پهنای ثابت از خاک و ماده افزودنی می‌گردد. با هم پوشانی ستون‌ها قبل از گیرش کامل، دیوارهای پیوسته‌ای زیر زمین به وجود می‌آید. مقاومت مخلوط به دست آمده تابع عواملی نظیر نوع ماده افزودنی، نوع خاک و روش اجرا است. روش اختلاط عمیق برای بهسازی محدوده وسیعی از خاک‌های نرم غیر آلی و خاک‌هایی که سایر روش‌های بهسازی در آن‌ها مناسب نیستند کاربرد دارد.



شکل 3 : روش اختلاط عمیق

4–1 دامنه کاربرد روش اختلاط عمیق:

دامنه کاربرد روش اختلاط عمیق در انواع خاک‌ها در شکل 4 نشان داده شده است.



شکل 4 : دامنه کاربرد روش اختلاط عمیق در انواع خاک‌ها

4–2 انواع روش‌های اختلاط عمیق بر حسب تزریق مواد:

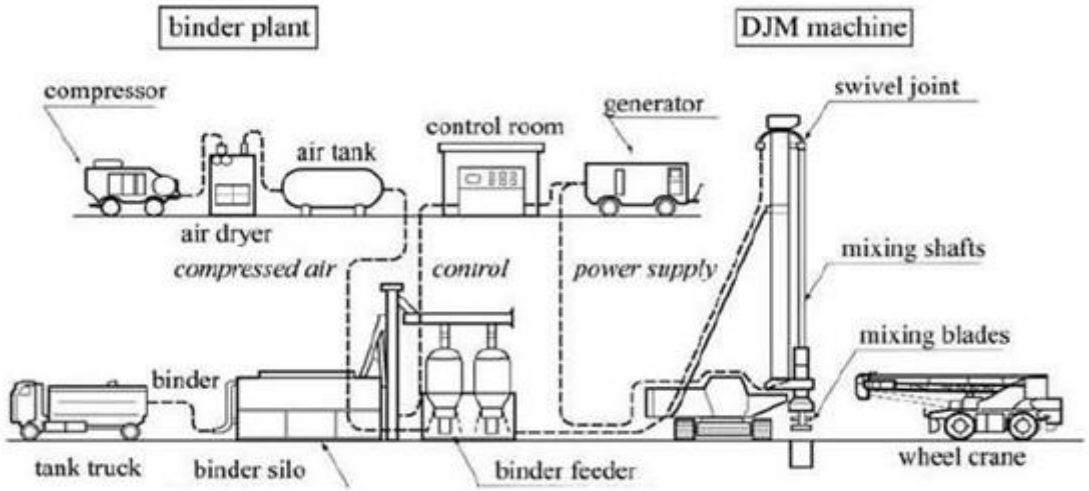
4–2–1 روش تر:

در این روش ابتدا ماده افزودنی در ایستگاه دوغاب سازی با آب با نسبت‌های معین ترکیب‌شده و دوغاب ساخته‌شده در ایستگاه تزریق به وسیله پمپ و شلنگ مخصوص به لوله‌های حفاری انتقال‌یافته و به صورت ثقلی وارد خاکی که قبلاً به وسیله تیغه‌ها به‌هم‌خورده است، می‌شود. از این روش بیشتر در کشورهای ژاپن و آمریکا استفاده می‌شود. قطر ستون‌هایی که به وسیله این روش اجرا می‌گردند تا 1.2 متر بوده و نیروی گشتاوری که برای چرخاندن میله هادی و تیغه‌ها لازم است تا 160 کیلو نیوتن متر است. در این روش سرعت چرخش تیغه‌ها 100 تا 200 دور بر دقیقه، سرعت نفوذ به داخل خاک حدود 50 سانتی متر بر دقیقه و دبی دوغاب تزریق‌شده به خاک در حدود 35 تا 70 لیتر بر دقیقه است. مقدار ماده افزودنی در خاک‌های سست آلی برای به دست آوردن مقاومت 100 تا 150 کیلو پاسکال در حدود 300 تا 400 کیلوگرم بر مترمکعب است. نحوه‌ی انجام این روش در شکل 5 نشان داده شده است.

شکل 5 : روش تر اختلاط عمیق

4–2–2 روش خشک:

در روش خشک، ماده افزودنی بدون این که با آب مخلوط شود با فشار هوا وارد خاک می‌شود. از روش خشک در خاک‌هایی که رطوبت اولیه آن‌ها بالاست و یا خاک‌های سستی که مقاومت کمی داشته باشند استفاده می‌شود. استفاده از هوای فشرده به عنوان محیط انتقال مواد افزودنی این امتیاز را دارد که مقدار کمتری ماده افزودنی برای به دست آوردن مقاومت مورد نیاز لازم است و در نتیجه باعث کاهش هزینه‌های اجرا می‌شود. این روش در کشورهای اسکاندیناوی و شمال اروپا کاربرد دارد. در روش خشک قطر ستون‌های اجراشده از 0.5 تا 1 متر متغیر است و به همین دلیل نیروی گشتاوری که برای چرخاندن میله هادی و تیغه‌ها لازم است بین 6 تا 50 کیلو نیوتن متر و سرعت چرخش تیغه‌ها 120 تا 200 دور بر دقیقه است. مقدار ماده افزودنی در خاک‌های سست آلی در روش خشک برای به دست آوردن مقاومت در حدود 250 تا 350 کیلوگرم بر مترمکعب است. روند اجرای این روش در شکل 6 نشان داده شده است.



شکل 6 : روند اجرای روش خشک اختلاط عمیق

3-4 نتایج تراکم روش اختلاط عمیق:

1. این روش به طور هم زمان نشست را کاهش و ظرفیت باربری خاک را افزایش می‌دهد.
2. در مواردی هزینه اجرای پروژه با این روش کمتر از هزینه اجرای آن توسط روش‌های دیگر است.
3. ارتعاش کم و صدای تولیدی ناچیز از دیگر مزایای این روش است. نقطه مقابل این روش تراکم دینامیکی برای اصلاح مشخصات مکانیکی زمین است.
4. سرعت اجرای بالا نسبت به روش‌های دیگر هم از دیگر مزیت‌های این روش است.
5. تنوع زیاد در آرایش و فضای ستون‌ها
6. کمترین آثار نامناسب محیطی

5. نتیجه‌گیری

پس از بیان دو روش بهسازی خاک، تراکم دینامیکی و اختلاط عمیق و نحوه‌ی اجرا و دامنه کاربرد هر روش و تراکم‌های حاصل از دو روش به این نتیجه می‌رسیم که، در سواحل جنوبی کشور با توجه به نوع خاک و شرایط منطقه بهترین روش برای تراکم این مناطق روش تراکم دینامیکی است اما، در سواحل شمالی با توجه به نوع خاک و شرایط زمین و نزدیک بودن به مناطق مسکونی بهترین روش تراکم، روش اختلاط عمیق است. همچنین با توجه به سطح آب بسیار بالا در سواحل شمالی که در عمق یک تا دو متری از سطح زمین قرار دارد، استفاده از روش تراکم دینامیکی با مشکلاتی دیگری نیز همراه خواهد بود چرا که عموماً بکار گیری این روش در مناطقی که سطح آب بالا دارند به دلیل افزایش قابل‌توجه فشار آب منفذی در زمان تراکم به دلیل انرژی بالای ضربات وزنه رهاشده روی سطح خاک خود می‌تواند منجر به گسیختگی خاک پیرامون محل فرود وزنه گردد.

6. قدردانی

از تمامی کسانی که در تهیه‌ی این مقاله من را یاری کردند تشکر و قدردانی می‌کنم.

7. مراجع

1. علی‌محمد رجبی، راضیه صدر؛ مروری بر روش اختلاط عمیق به عنوان یکی از روش‌های بهسازی خاک‌های مسئله‌دار، پنجمین کنفرانس ملی دستاوردهای اخیر در مهندسی عمران، معماری و شهرسازی، تهران، 1397

2. *Filz, G.M., Navin, M. P. (2006). "Stability of column-supported embankments." Rep. No. VTRC 06-CR13, Virginia Transportation Research Council, Charlottesville, VA.*

3. *Takahashi, H., Kitazume, M. (2004). "Consolidation and permeability characteristics on cement treated clays from laboratory tests", Proc. of the International Symposium on Engineering Practice and Performance of Soft Deposits, pp: 187–192.*

4. *Ariyarathne, P., Liyanapathirana, D.S., Leo, C.J. (2013) "Effect of geosynthetic creep on reinforced pile-supported embankment systems" Geosynth. Int. Vol. 20, No. 6, PP: 421-435.*

5. *Kavandi, P., Firoozfar, A., Hemmati, M. A. (2017). "Bearing capacity assessment of collapsible soils improved by deep soil Mixing using finite element method", Open Journal of Geology, Vol. 6, PP: 1055-1068.*

6. *Chai, J. C., Shrestha, S., Hino, T., WO Ding, Kamo, Y., Cater, J. (2015). "2D and 3D analyses of an embankment on clay improved by soil–cement columns", Computer and Geotechnic, Vol. 68, PP: 28-37.*

7. *Wang SY. Fundamental study of static and dynamic compaction grouting in complete decomposed granite, PhD thesis. Department of Building and Construction, City University of Hong Kong, Hong Kong, China; 2006.*

8. *Chow,Y.K., Yong, D. M., Yong, K. Y., Lee, S. L., "Monitoring of dynamic compaction by deceleration measurements", Computers and Geotechnics, Vol.90, No.3, 1990, PP.189-209.*

9. *Pan, J.L., Selby, A.R. 2002. Simulation of dynamic compaction of loose granular soils. Advances in Engineering Software 33, 631-640.*

10. *Lukas,R.G., 1995, "Geotechnical Engineering Circular Ni. 1, DYNAMIC COMPACTION", Federal Highway Report FHWA-SA-95-037.*