

معرفی ستون سنگی به عنوان یکی از تکنیکهای جدید تقویت خاکهای سست (محدودیت ها و راهکارها)

فرهاد آهی¹، امیر حسین رفیعی¹

Amir_h_r65@yahoo.com

1: دانشجوی کارشناسی مهندسی عمران دانشگاه رازی کرمانشاه

خلاصه

ستونهای سنگی بعنوان یک گزینه ایده آل جهت بهسازی خاکهای سست نظیر رس و ماسه لای دارشل به شمار می روند. با اجرای ستونهای سنگی، ظرفیت برشی خاک به طور قابل ملاحظه ای افزایش یافته و از طرفی مقدار نشست خاک نیز کاهش می یابد و میتوان به سطح مناسبی از ضریب ایمنی در روانگرایی رسید. در حال حاضر اجرای ستونهای سنگی بیشتر بعنوان یک روش تجربی شناخته شده است و نیاز به تحقیقات گسترده جهت پیش بینی مقاومت نهایی خاک تقویت شده با این روش ضرورت دارد. در این تحقیق ضمن معرفی این روش تقویت خاک نسبت به محدودیتهای روش و راه کارها بحث و بررسی بعمل آمده است.

کلمات کلیدی: ستون سنگی، بهسازی خاک، روانگرایی و Stone column

1- مقدمه

معمولاً در دره ها و حاشیه رودخانه ها خاک های سست نظیر رس ها، لیمونها، خاکهای باتلاقی و ماسه های نرم واقع شده اند. این محل ها معمولاً مسیر اجرای شبکه های راه آهن و جاده های دسترسی می باشند و همچنین بیشتر کارخانجات نیز بر روی همین نوع خاکها ساخته می شوند. همان طور که ملاحظه می شود نیاز به توسعه سایت های اجرایی در زمین های نامناسب (از لحاظ ژئوتکنیکی)، محدودیتهای زیست محیطی در استفاده از زمین های مرغوب و ... نیاز به توسعه روش های جدید جهت بهسازی زمین های نا مرغوب بیش از پیش نمود پیدا می کند.

اجرای ساختمانهای صنعتی و پروژه های فوق روی چنین بسترهایی نیازمند بهسازی خاک زیر پی آن ها به منظور بهبود مشخصات مکانیکی خاک می باشد که این امر با تکنیک های جدید امکان پذیر است. انتخاب روش مناسب برای بهسازی در یک سایت مشخص از درجه اهمیت بالایی برخوردار بوده و بسته به شرایط پروژه، اعم از محل اجرا، سازه های مجاور، تکنولوژیهای ساخت، اقتصاد پروژه و ... از یکی از روش های بهسازی زمین می توان بهره جست. در این میان روش تراکم لرزه ای خاک بدلیل سهولت اجرا، از مقبولیت گسترده تری برخوردار است.

2- روش های بهسازی خاکها:

امروزه روش های متعددی برای بهسازی خاکها وجود دارند که به دسته های زیر تقسیم می شوند:

1- بهسازی خاک توسط تراکم دینامیکی.

2- بهسازی خاکهای دانه ای و سست به کمک عمل تزریق در آنها.

3- بهسازی خاک توسط اجرای المانهای قائم نظیر ستون سنگی ، ستون سیمان و یا تزریق سیمان توسط جت (Jet grouting) .

4- (.....)

قابل ذکر است هر کدام از این روش ها جهت بهسازی خاک شامل چهار مرحله زیر میباشد (Dhouib et al., 2004c):

1- تعیین اهداف بهسازی خاک .

2- شناسایی خاک از نظر دانه بندی و مطالعه سطح تراز آبهای زیر زمینی در آنها.

3- انتخاب گزینه مناسب جهت بهسازی خاک .

4- بهینه سازی راه حل انتخاب شده که متناسب با نوع خاک و شرایط طبیعی آن باشد .

انتخاب مناسب ترین روش بهسازی خاک در یک پروژه خاص، تابع صریحی از دانه بندی خاک می باشد. بنا به تجربیات قبلی (Dhouib, 2003) در این زمینه برای خاکهای مختلف توصیه های زیر وجود دارد.

برای خاکهای دانه ای نظیر ماسه و شن به کمک روشهای تراکم دینامیکی و همچنین توسط عمل لرزش شعاعی میتوان نسبت به استقرار ستون سیمانی اجرا شده توسط جت کمک گرفت. پس از تراکم اولیه و دستیابی به خاکی که دیگر توسط عمل تراکم نمی توان به تراکم بالاتری در آن رسید . اکنون بایستی با تکنیک دیگری نظیر ستون سنگی عمل بهسازی خاک را پیش ببریم . اجرای ستون سنگی در خاک به منزله آن است که خاک مقاومت جانبی چندان قابل توجهی ندارد .

هنگامیکه خاک مورد نظر برای تراکم رفتاری چسبناک و تراکم پذیر داشته باشد و یا دارای درصد قابل توجهی مواد ارگانیکی باشد، این نوع خاک نمی تواند مقاومت برشی دانه های سنگی موجود در چنین خاکی را انتقال دهد. لذا استفاده از **column stone** در چنین خاکهایی به منظور تقویت و اصلاح رفتار خاک مناسب نمی باشد و دلیل آن وجود رفتار متعیر اجزای اورگانیکی و تغییرات فرم آنها در طول زمان می باشد.

در خاکهایی اورگانیکی که مقدار آب موجود در آنها به صورت طبیعی افزایش یافته باشد، روش تزریق سیمان خشک میتواند کاربرد داشته باشد. هنگامیکه درصد آب طبیعی کم باشد این روش را میتوان در حالت مرطوب آن اجرا نمود.

تکنیکهای اجرایی بهسازی خاکها همچنین به طبیعت خاکها و روش تراکم خاک و تمایل خاک برای تحکیم بستگی دارد .

همان طوری که می دانید محدوده ی مقاومت خاکهای ریز دانه و درشت دانه متفاوت می باشد و دسته بندی انجام شده در شکل 1 تابع میزان نفوذ مخروط استاتیکی در خاک می باشد . به طوری که برای خاکهای دانه ای آزمایش (اس پی تی) و در حالت عادی آزمایش پرسیمتری صورت گرفته است .

3- روش بهسازی خاک توسط ستون سنگی به روایت تاریخ

روشهای بهسازی لرزه ای خاکها در اعماق پایین آنها به منظور متراکم نمودن آن، تکنیک های تازه ای نیستند. در سال 1860 بود که جرعه استفاده از چنین تکنیکی در آزمایشگاه توسط Johann Keller زده شد. در سال 1900 اکتوان دیجن (A. Degen) آن را در استراسبورگ فرانسه عملی کرد. در سالهای 1903 تا 1908 از این تکنیک برای مهار سفرهای آبهای زیر زمینی استفاده می شد.

این تکنیک در بیشتر کشورهای اروپایی در زمینه های مختلفی گسترش پیدا کرد. تجربه مهندسين در زمینه بهسازی خاک نشان داده است که لرزش قائم خاک که توسط وسایل لرزشی انجام می شود، باعث بروز پدیده روانگرایی در خاک های ماسه ای می شود، به طوری که تغییر حجم در سطح خاک به صورت چشمی قابل رؤیت می باشد.

این مشاهدات شرکت های Johann Keller و Seregey Steuemon را به ساخت ماشین مخصوص در این زمینه در سال 1933 هدایت نمود. علاقه مندی به تکنیک متراکم نمودن خاک توسط لرزش خاک در اعماق ابتدا در آلمان شکل گرفت و (A 36) Loos نسبت به ارائه گزارشی در مورد تکنیک های مختلف ویبراسیون در اولین کنفرانس بین المللی مکانیک خاک که در سال 1936 در کمبریج برگزار شد (Massachuset, U. S., 1930) اقدام نمود.

1- تعیین نقاط بحرانی پروژه از نظر میزان نشست پذیری خاک.

2- شناخت مشخصات فیزیکی و مکانیکی خاک و تعیین روش مناسب بهسازی خاک که باید بیشترین سازگاری را با خاک داشته باشد.

اعمال پروسه ی بهسازی خاک در آلمان و سایر کشورهای اروپایی آغاز و مراحل پیشرفت را پشت سر گذاشت.

- در سال 1936 یک لایه خاک ماسه ای به ضخامت 16m برای ساخت یک ساختمان مهم در نورنبرگ آلمان انجام شد.
- در سالهای 45 - 1944 در حاشیه رود weser در منطقه Bermen-Farge آلمان یک ساختمان روی خاکریزی از نوع ماسه متراکم شده به وسعت $16000 m^2$ احداث گردید.
- موارد متعدد دیگری نیز در این خصوص انجام شده است.

تکنیک بهسازی خاک بوسیله ستون قائم شامل تزریق مصالح دانه ای در خاک سست با هدف اصلاح خاک صورت میگیرد. خصوصیات فیزیکی خاک اصلاح شده نسبت به خاک اصلاح نشده دارای مزایای متعددی است که اهم این مزایا عبارتند از:

- بهبود خصوصیات مکانیکی خاک در محلهای اصلاح شده.
- کاهش نشست خاک.
- افزایش ظرفیت باربری خاک.
- افزایش ضریب نفوذ پذیری قائم خاک و افزایش سرعت تحکیم در آن.
- افزایش پایداری ترانشه ها.
- کاهش خطر روانگرایی در مناطق زلزله خیز.

در این زمینه، از سال 1950 به بعد پروسه های متعددی ارائه شده که مختصری از آنها در زیر آمده است:

- شمع های ماسه ای متراکم شده مشابه تکنیک ژاپنی (Compozer) اجرا می شوند. (Aboshi et al. 1979)
- ستونهای سنگی به کمک ویبراتوار الکتریکی تحت نام ویبرور هیدرولیکی که توسط Keller در سال 1936 ارائه شد، اجرا می شود.
- شمع های ماسه ای متراکم شده مشابه شمع های کلاسیک که در خاک های سست به کمک تیوب محدود کننده کار گذاری می شوند. این تکنیک به تکنیک Franki معروف است. (Bustamunte el al. 1991) Franki نام شرکتی است که برای اولین بار ستون سنگی کوبیده و ستون ماسه ای را ابداع و اجرا نمود. همچنین Franki نوعی ستون سنگی را که در آن از یک لرزاننده ی هیدرولیکی استفاده می شود و مشابه روش vibro replacement می باشد را به وجود آورد.

4- انواع ستون های سنگی

بهسازی یک خاک سست با کمک ستون سنگی یا ماسه ای می تواند با تکنیک های متفاوت حفاری ، جایگزینی و تراکم انجام پذیرد . روش های اصلی اجرای این ستون ها که در شرایط مختلف سایت ها قابل اجرامی باشند ، به صورت زیر است:

4-1 - vibro replacement یا روش تر :

در این روش با استفاده از فشار جت آب ، گودالی تا عمق مورد نظر در خاک حفاری خواهد شد . مواد حفاری شده از گودال با فشار زیاد آب از گودال خارج می شوند و پس از حفاری سنگ تا ارتفاع 3 / . تا 1 / 2 متر درون گودال ریخته شده و توسط ویبراتور الکتریکی یا هیدرولیکی موجود در سر میله حفاری متراکم می شود . سپس لیفت بندی سنگ ریخته و متراکم خواهد شد تا اینکه گودال با سنگ متراکم پر شود . بهترین نتایج زمانی بدست می آید (بوده و بهترین عمق لایه بهسازی شده در رنج 6 - 10 متر باشد که در روش های اجرایی اخیر ، این $15.50 \text{ KN} / \text{m}^2$ که مقاومت برشی خاک بین عمق افزایش یافته است .

4-2 - vibro displacement یا روش خشک :

روش خشک یک فرایند بدون آب است که در بعضی از مواقع به روش تر ترجیح داده می شود . تفاوت اصلی روش تر و خشک ، نبودن جت آب در طول شکل گیری اولیه گودال می باشد . شرط لازم برای استفاده از این روش ، پایدار ماندن گود پس از حفاری است ، لذا مقاومت برشی خاک مورد نظر می (باشد . سطح آب زیر زمین در این گونه سایتها باید به اندازه کافی پائین باشد . هر چند با رشد تکنولوژی های اخیر $40.60 \text{ KN} / \text{m}^2$ بایست بیش از (قابلیت استفاده از روش خشک در خاکهای نرم و سطح آب زیر زمینی بالا امکان پذیر شده است .

4-3 - ستونهای سنگی کوبیدنی یا Compacted stone column :

در این روش با کوبیدن یک لوله ته بسته یا ته باز با ایجاد یک گود در زمین فضایی برای ریختن سنگ ایجاد خواهد شد . سپس مخلوطی از سنگ ماسه درون زمین ریخته شده و با رها کردن وزنه های سنگین این بخوبی متراکم خواهد شد . این روش که بیشتر به ستون های سنگی (شمع های فرانکی) مشهور است ، به طور قابل توجهی در بلژیک مورد استفاده قرار گرفته است . بکار بردن لوله های ته بسته یا ته باز مانع از ریخته شدن جداره گودال در زمین های سست خواهد شد . لذا از این روش به طور وسیعی می تواند در زمین های مورد استفاده قرار گیرد .

4-4 - شمع های متراکم ماسه ای Compacted sandy pile :

در این روش با استفاده از ضربه و لرزش ، لوله فولادی درون خاک فرو رفته و درون آن با ماسه پر خواهد شد . پس از متراکم کردن ماسه ، لوله فولادی به آرامی بیرون کشیده می شود و در هر مرحله از بیرون آمدن لوله ، عملیات تراکم ماسه تکرار خواهد شد که این پروسه تا خروج کامل لوله فولادی از گودال ادامه خواهد یافت . از این روش به طور گسترده ای در ژاپن استفاده شده است . از این روش برای خاکهای رسی نرم با سطح آب زیر زمینی بالا بهره برده می شود .

دو روش اخیر به ستون های کوبیدنی فرانکی مشهورند . از این روش ها عمدتاً در تقویت بسترانبار های کالا ، پی های ضعیف ، ساختمان های چند طبقه ، مخازن نگهداری سیالات و تونل های که از درون خاکریزها عبور می کنند، استفاده می شود. در چنین کاربردهایی هدف اصلی محدود کردن نشست کلی و

در برخی موارد زمان مورد نیاز برای اجرای ستون بیشتر از سایر روش هاست. همچنین جلوگیری از راندن پوشش باعث له شدن دانه های خاک و سر شدن آن در سطح جانبی گودال می شود و از نفوذپذیری شعاعی خاک می کاهد. به علت وزن زیاد دستگاه کوبنده ای که در طول مراحل ساخت به کار می رود، در خاک های چسبیده با نفوذپذیری کم فشار آب منفذی اضافی بزرگی به وجود می آید. این فشار به سرعت از بین می رود و موجب تحکیم سریع خاک می شود. اگر برای ساخت ستون از درشت دانه با دانه بندی باز استفاده شود، ممکن است گرفتگی اتفاق بیفتد و از تاثیر ستون سنگی به عنوان زهکش قائم بکاهد. همچنین در کاربرد هایی مثل پایدار سازی شیروانی ها گسترش فشار آب منفذی اضافی اجتناب نا پذیر است. در این موارد کاهش سطح انرژی ورودی می تواند موجب کم شدن این مشکل شود.

5- کاربرد های ستون سنگی

ستون سنگی با کاربرد های متنوع در بهسازی زمین به عنوان یک تکنیک موفق جهت حصول اطمینان به شرایط زیر شناخته شده است :

- ❖ بهبود پایداری شیروانی های طبیعی و یا خاک ریز ها .
- ❖ افزایش ظرفیت برشی خاک .
- ❖ کاهش میزان نشست کل و تفاضلی .
- ❖ کاهش پتانسیل روانگرایی خاک های ماسه ای .
- ❖ افزایش آهنگ نشست .

از این روش جهت بهسازی پی سازه هایی که روی خاکهای چسبیده نرم یا سخت، ماسه های لای دار شل که حاوی بیش از 15٪ ریز دانه می باشند، بهره برده می شود. ارتفاع ستون سنگی به کار رفته در کار های عملی بین 4 تا 15 متر می باشد که در اعماق کمتر از 6 متر این روش بسیار کاربردی و اقتصادی خواهد بود و ستونهای با عمق بیش از 15 متر در مقایسه با پی های عمیق متعارف صرفه اقتصادی نخواهد داشت. علاوه بر این، اجرای ستون سنگهای سنگی با اعماق زیاد مشکلات اجرایی خاصی از قبیل پایداری گود ها و تراکم مناسب ستون سنگی را در پی خواهد داشت. برای استفاده را پیشنهاد $KN/m^2 (150 \text{ Psf})$ از ستون سنگی در خاکهای با مقاومت برشی زهکشی نشده بسیار پائین محققین مقدار مقاومت زهکشی نشده $100 \text{ KN} / 50 - 2000 \text{ Psf}$ تا 1000 Psf داده اند. با توجه به مقاومت در مقابل نفوذ و پیراتور و دیگر ملاحظات اقتصادی حد مقاومت برش (به عنوان حد بالای مقاومت زهکشی نشده خاکهای قابل بهسازی توسط این روش در نظر گرفته شده است. در حقیقت خاکهای با مقاومت برشی m^2 زهکشی نشده بالاتر می توانند بدون نیاز به زهکشی بار های وارده را تحمل کنند.

مراجع

1. Aboshi, H., Ichimoto, E., Enoki, M. and Haraka, K. "The Compozer – A Method to Improve Characteristics of Soft Clays by Inclusion of Large Diameter Sand Columns". *Proceedings of International Conference on Soil Reinforcement: Reinforced Earth and other Techniques*, Paris, Vol. 1, p.211-216(1979).
2. Balaam, N.P. and Poulos, H.G, "The behavior of foundations supported by clay stabilized by stone columns", *Proceedings of Specialty sessions, VII European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Helinski. Vol.2.(1983)
3. Bowels, J.E., *Foundation Analysis and Design*, 4th Edition, McGraw Hill, 278 p(1988). Datye, K.R. and Nagaraju, S.S., "Design Approach and Field Control for Stone Columns". *Proceedings of 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Stockholm, pp.637-640(1981).

4. Deshpande, P.M and Vyas, A.V., "Interactive encased stone column foundation", *Sixth International Conference and Exhibition on Piling and Deepfoundation, DFI'96, ISSMFE, Bombay*, pp1-19(1996)
5. Deshpande, P.M and Vyas, A.V., "Interactive encased stone column foundation", *Sixth International Greenwood, D.A., "Mechanical Improvement of soils below ground surface", Conference on Ground Engineering, Institution of Civil Engineers, London*, pp. 11-22(1970).
6. Greenwood, D.A. and Kirsch, K., "Specialist Ground Treatment by vibratory and dynamic methods – State of Art", *Advances in Piling and Ground Treatment for Foundations*, Institution of Civil Engineers, London, England, pp 17-45(1983).
7. Hughes, J.M.O and Withers, N.J., "Reinforcing of soft cohesive soils with stone columns", *Ground Engineering*, Vol. 7, No. 3 pp. 42-42 and pp. 47- 49(1974).
8. Katti, R.K., Katti, A.R and Naik, S., Monograph to analysis of stone columns with and without geosynthetic encasing, *CBRI publication, New Delhi*.(1993)
9. Madhav, M.R., Miura, N. & Alamgir, M., "Analysis of Granular Column Reinforced Ground", *5th International Conference on Geotextile, Geomembranes and Related Products*, Singapore.(1994)
10. Meyerhof, G.G. and Sastry V.V.R.N, "Bearing capacity of piles in layered soils", part I and II, *Canadian Geotechnical Journal*, 15, pp. 171- 189(1978).
11. Mitchell, J.K. and Huber, T.R., "Performance of a stone column foundation", *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, 111, pp. 205- 223(1985).
12. Narasimha Rao S.N., "Studies on groups of stone columns in soft clays", *Symposium on Ground Improvement Techniques for practicing engineers, Chennai*, pp.84-93(2000).
13. Nayak, N.V., "Recent advances in ground improvements by stone column", *Proceedings of Indian Geotechnical Conference, Madras*, Vol. 1, p. V- 19(1983).
14. Priebe, H. J., "An evaluation of settlement reduction in soil improved by vibroreplacement". (en alemán). *Bautechnik*, n° 53, pp. 160-162(1976).
15. Van Impe, W. Y, De Beer, E., "Improvement of settlement behaviour of softy layers by means of stone columns", *Proceedings of 8th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Helsinki*. pp. 309-312(1983).
Vesic, A.S., "Expansion of Cavities in Infinite Soil Mass", *Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering Division*
16. Areias, P.M.A. and Belytschko, T. (2005) Analysis of three-dimensional crack initiation and propagation using the extended finite element method. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, **63** (55), 760–788.
17. Atluri, S.N. and Shen, S. (2002) *The Meshless Local Petrov–Galerkin (MLPG) Method*. Tech Science Press, USA.
18. Zi, G., Song, J.H., Budyn, E., Lee, S.H. and Belytschko, T. (2004) A method for growing multiple cracks without remeshing and its application to fatigue crack growth. *Modeling and Simulations for Material Science and Engineering*, **12**, 901–915.
19. Barsoum, R. (1981) An assessment of the quarter-point elements in pressure vessel fracture analysis. *Sixth International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology*, Paris.
20. Dumstorff, P. and Meschke, G. (2003) Finite element modelling of cracks based on the partition of unity method. *Proceedings of Applied Mathematics and Mechanics (PAMM)*, **2**, 226–227.
21. Sethian, J.A. (2006) *Moving interfaces and boundaries: level set methods and fast marching methods*. http://math.berkeley.edu/~sethian/Explanations/level_set_explain.html.