

آنالیز اجزا محدود ستونهای ماسه / سنگی محصور در ژئوتکستایل

رضا احمدی

دانشجوی کارشناسی ارشد خاک و پی دانشگاه آزاد زنجان

Daryacheye_noor61@yahoo.com

خلاصه

ستونهای سنگی عموماً برای بهبود ظرفیت باربری لایه های رسی بکار می روند ولی چنانچه رس مورد نظر بسیار سست باشد موجب گسیختگی ستون خواهد شد. بدین منظور برای اجتناب از پاشیدگی ستون و بهبود آن، از پوشش ژئوتکستایل با مقاومت کششی بالا که ستون سنگی را در بر می گیرد استفاده می شود. در این مقاله خلاصه ای از نحوه اجرا و روشهای محاسبه ارائه شده و در آخر برای ارزیابی عملکرد این ستونها با استفاده از نرم افزار plaxis آنالیز المان محدود صورت خواهد گرفت.

کلمات کلیدی: ستون سنگی ، ژئوتکستایل ، plaxis

مقدمه:

سیستم Geotextile encased column (GEC) یک روش جدید بهبود خاک می باشد و در ابتدا برای بهبود فونداسیون خاکریزهای جاده در آلمان ، سوئد و هلند مورد استفاده قرار گرفته است (اخیراً همچنین در ساخت دایک و بازیابی زمین land reclamation ، مورد استفاده قرار گرفته است). اساساً این روش شاخه ای از روشهای شناخته شده و معروف ستون سنگی (stone column) و فونداسیون شمعی ماسه متراکم (sand compaction pile foundation) می باشد. تنها تفاوت این روش جدید آنست که ستون با ژئوتکستایلی با مقاومت کششی بالا محصور شده است. برخلاف ستونهای متداول ماسه شن ، به دلیل پوشش ژئوتکستایل که تکیه گاه جانبی لازم را تامین می کند ، سیستم GEC می تواند در خاکهای بسیار سست ($C_u < 15 \text{ kn/m}^2$) مانند خاک های آلی (peat) ، رس، سیلت بسیار سست و همچنین گل و لای (sludge) ، مورد استفاده قرار گیرد.

روشهای نصب

در اجرا معمولاً از دو روش برای نصب سیستم GEC استفاده می کنند. این روشها عبارتند از روش جابجایی و روش و جایگزینی . در روش جایگزینی یک لوله استوانه ای تو خالی (معمولاً $\phi = 150 \text{ cm}$) به داخل لایه باربر در عمق رانده می شود و خاک داخل استوانه تو خالی توسط مته حفاری و تخلیه می شود (شکل 1) . در حالی که در روش جابجایی به کمک ویبره ، استوانه فولادی (معمولاً $\phi = 80 \text{ cm}$) با انتهای بسته مخروطی شکل که دو لبه برش دارد ، خاک سست را با حرکت لرزشی جابجا کرده و به لایه باربر می رسد. سپس در هر دو مورد، کیسه ژئوتکستایل تو خالی در داخل لوله تو خالی استوانه ای قرار می گیرد و با شن و ماسه پر می شود و این در حالیکه لوله به آرامی و تحت لرزش (برای رسیدن به بیشترین تراکم) بیرون کشیده می شود.



شکل 1- روش اجرای سیستم جابجایی و جایگزینی

روش جایگزینی در مواردی نظیر خاکهای با مقاومت نفوذی نسبتا بالا و یا زمانی که باید اثرات لرزش بر سازه های مجاور و تاسیسات راهسازی کمترین مقدار باشد، مقدم تر است. مزایای روش جابجایی لرزشی در مقایسه با روش جایگزینی عبارتند از (1) نصب سریعتر و ارزانتر ستونها، (2) خاک مجاور به خاطر جابجایی متراکم تر خواهد شد، (3) عدم نیاز به حمل خاکهای بیرون آمده. و همچنین بدیهی است که روش جابجایی خاک معایبی نیز دارند که عبارتند از: افزایش فشار منفذی هنگام نفوذ، اثرات لرزش بر روی محیط و تغییر شکلهای بوجود آمده به خاطر خاک جابجیل شده.

سیستم باربری GEC:

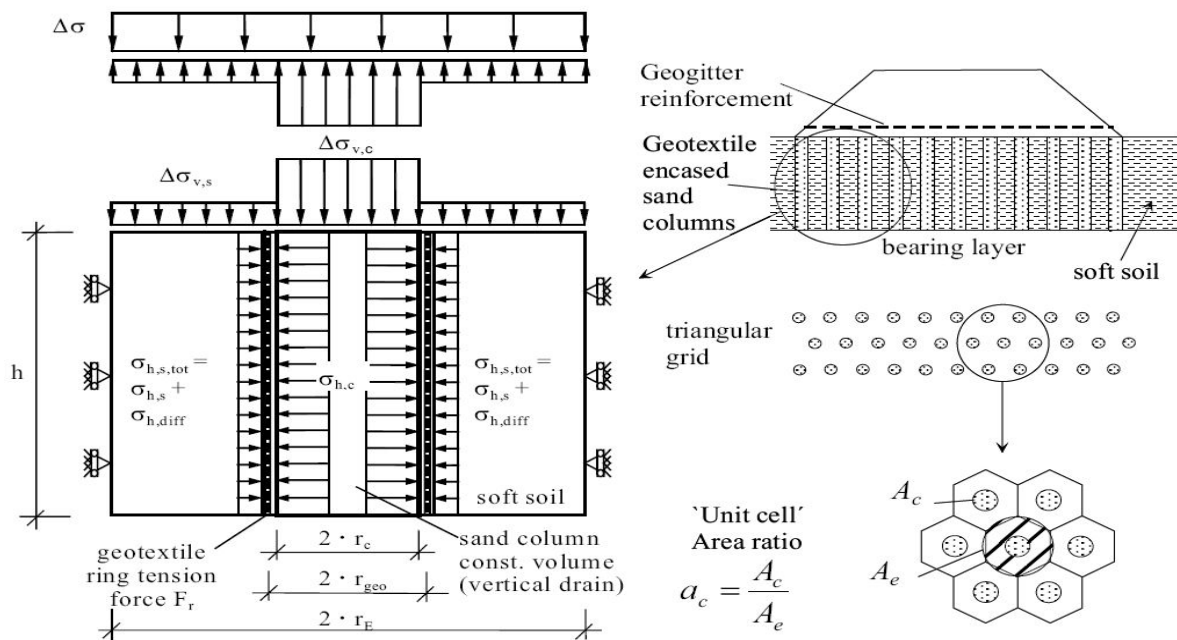
در سیستم GEC ستونهای ماسه ای و شنی برای کاهش میزان بار وارده بر خاکهای سست در داخل لایه باربر نصب می شوند. به خاطر وجود پوشش ژئوتکستایل در ترکیب با خاکهای ضعیف مجاورش، ستون همانند یک تکیه گاه شعاعی عمل می کند و این در حالیست که پوشش ژئوتکستایل در اثر تنشهای محیطی تحت کرنش قرار می گیرند. (Raithel et al. 2005; Raithel 1999) سیستم GEC بر خلاف ستونهای غیر پوشش دار، به دلیل پوشش ژئوتکستایل که تکیه گاه جانبی لازم را تامین می کند، می تواند در خاکهای بسیار سست ($C_u < 15 \text{ kn/m}^2$) مانند خاک های آلی (peat)، رس / سیلت بسیار سست و همچنین گل و لای (sludge)، مورد استفاده قرار گیرد. در ستونهای غیر پوشش دار، توان تکیه گاه افقی خاک سست باید مساوی فشار جانبی در ستون باشد، در غیر اینصورت گسیختگی و شکست ستون امر طبیعی می باشد. در حالی که در یک سیستم GEC به خاطر پوشش ژئوتکستایل، تکیه گاه جانبی خاک سست می تواند بسیار کمتر باشد. همچنین فشار جانبی بستگی به فشار قائم روی خاک سست دارد که میتواند بسیار کوچک باشد. بنابراین ممکن است به تمرکز تنش روی سر ستون و تقلیل فشار قائم روی خاک سست و در نتیجه به کاهش زیاد نشست دست پیدا کنیم. برای مقاومت در برابر نیروهای محیطی، ژئوتکستایل باید بصورت یکپارچه تولید شود. از طرف دیگر این ستونها می توانند به عنوان زهکش قائم عمل کنند.

GEC در داخل یک سیستم شبکه ای منظم مستطیلی یا مثلثی قرار می گیرد. برای مثال سطح تاثیر (A_e) یک ستون واحد (A_c) در یک شبکه مثلثی یک سطح شش ضلعی می باشد که می تواند با یک سطح دایره ای هم ارز و معادل جایگزین شود (شکل 2).

روش محاسبه تحلیلی:

مدل تحلیلی متقارن محوری مطابق مفهوم unit cell concept در شکل 2 به همراه بارهای وارده و شرایط مرزی نشان داده شده است (Raithel et al 2005; Raithel 1999). برای بدست آوردن مدل تحلیلی، در شرایط مرزی فرضیات زیر مورد ملاحظه قرار میگیرد:

- _ نشست مساوی ستون و خاک سست
 - _ نشست قابل صرفنظر لایه باربر در زیر ستون
 - _ در ستون ضریب فشار محرک زمین (K_0) در نظر گرفته می شود
 - _ اگر روش نصب از نوع جایگزینی باشد، می توان فشار خاک را در حالت ساکن فرض کرد و داریم $K_0 = 1 - \sin\phi$ و برای حالت جابجایی یک ضریب، بزرگتر از حالت سکون در نظر می گیرند. ($K_s = K_0, s^*$)
 - _ رفتار خطی - الاستیک ژئوتکستایل
- مدل تحلیلی این روش همانند مدل تحلیلی برای ستونهای سنگی (stone columns) و شمعهای ماسه ای می باشد. این معادلات با دخالت دادن اثر پوشش ژئوتکستایل توسعه و تکمیل شده اند. برای آنالیز تحکیم و محاسبات نشست، روشهای رایج محاسباتی برای پی ها می تواند مورد استفاده قرار گیرد.



شکل 2- مدل تحلیلی

تعداد فشار خارجی $\Delta\sigma_0$ و تنشهای عکس العمل ($\Delta\sigma_{v,c}$) و ($\Delta\sigma_{v,s}$)، باعث ایجاد معادله زیر میشود:

$$\Delta\sigma_0 \cdot A_e = \Delta\sigma_{v,c} \cdot A_c + \Delta\sigma_{v,s} \cdot (A_e - A_c) \quad (1)$$

برای تعریف A_c و A_e به شکل 2 مراجعه شود. با فرض اینکه ($\Delta\sigma_{v,0,c}$) و ($\Delta\sigma_{v,0,s}$)، تنشهای قائم اولیه در ستون و لایه سست خاک باشند، تنشهای افقی متناظر با آنها را می توان به صورت زیر نوشت:

$$\Delta\sigma_{h,c} = \Delta\sigma_{v,c} \cdot K_{a,c} + \sigma_{v,0,c} \cdot K_{a,c} \quad (2.a)$$

$$\Delta\sigma_{h,s} = \Delta\sigma_{v,s} \cdot K_{0,s} + \sigma_{v,0,s} \cdot K_{0,s}^* \quad (2.b)$$

اگر روش جایگزینی استفاده شود، $K_{0,s}^*$ باید با $K_{0,s}$ در معادله 2 جایگزین شود. با فرض رفتار الاستیک-خطی نیروی کششی محیطی ΔF_r در سطح ژئوتکستایل با شعاع r_{geo} می تواند به عنوان تابعی از کرنش جانبی و سختی ژئوتکستایل (j) به صورت زیر تعیین شود.

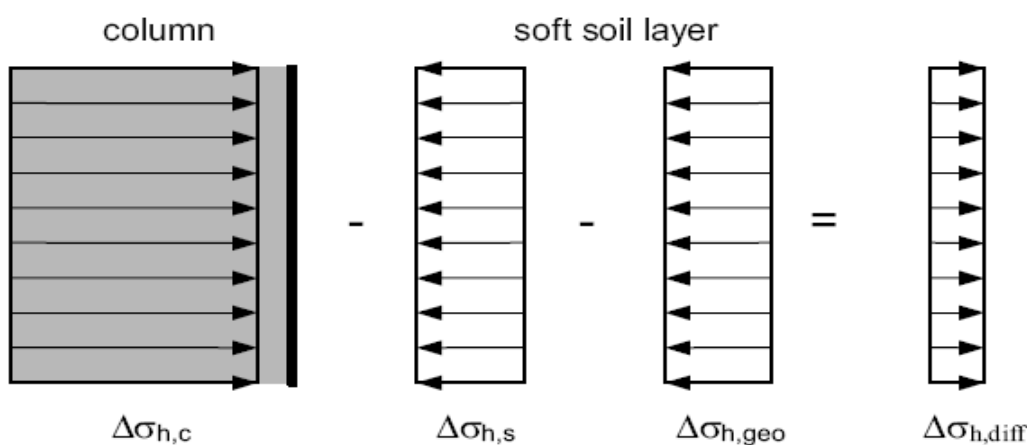
$$\Delta F_r = J \cdot \varepsilon = J \cdot \frac{\Delta r_{geo}}{r_{geo}} \quad (3)$$

با استفاده از فرمول boiler cylinder، نیروی محیطی می تواند به صورت زیر تبدیل به تنش افقی $\Delta\sigma_{h,geo}$ شود:

$$\Delta\sigma_{h,geo} = \frac{\Delta F_r}{r_{geo}} \quad (4)$$

مجموع تنشها در جهت افقی در مجاورت پوشش ژئوتکستایل موجب ایجاد اختلاف تنش ($\Delta\sigma_{h,diff}$) می شود که بر روی خاک تاثیر گذاشته و موجب تغییر شکلهای افقی می شود. اختلاف تنش مطابق معادله 5 بدست می آید و در شکل 3 نشان داده شده است.

$$\Delta\sigma_{h,diff} = \Delta\sigma_{h,c} - (\Delta\sigma_{h,s} + \Delta\sigma_{h,geo}) \quad (5)$$



شکل 3- تنش های افقی موجود بین ستون و خاک سست

اختلاف تنش منجر به انبساط جانبی ستون می شود. این تغییر شکل افقی (Δr_c) و نشست لایه خاک سست S_s را می توان با استفاده از معادلات سیلندر توخالی بارگذاری شده در جهت طولی و شعاعی بصورت زیر محاسبه کرد (Ghionna and Jamiolkowski 1981)

$$\Delta r_c = \frac{\Delta\sigma_{h,diff}}{E^*} \cdot \left(\frac{l}{a_e} - l \right) \cdot r_c \quad (6)$$

$$S_s = \left(\frac{\Delta\sigma_{v,s}}{E_{oed,s}} - 2 \cdot \frac{l}{E^*} \cdot \frac{v_s}{1-v_s} \cdot \Delta\sigma_{h,diff} \right) \cdot h \quad (7)$$

$$E^* = \left(\frac{1}{1-\nu_s} + \frac{1}{1+\nu_s} \cdot \frac{1}{a_c} \right) \cdot \frac{(1+\nu_s) \cdot (1-2\nu_s)}{(1-\nu_s)} \cdot E_{oed,s} \quad (8)$$

در این روابط ν_s نسبت پواسون و $E_{oed,s}$ constrained modulus می باشد. اگر حجم مصالح ستون ثابت فرض شود، میتوان رابطه زیر را بین نشست قائم و انبساط جانبی ستون برقرار کرد.

$$s_c = \left(1 - \frac{r_0^2}{(r_0 + \Delta r_c)^2} \right) \cdot h_0 \quad (9)$$

برای مطابقت تغییر شکلهای افقی لازم است که:

$$\Delta r_c = \Delta r_{geo} + (r_{geo} - r_c) \quad (9)$$

با توجه به مطالب قبلی فرض می شود که نشست ستون و لایه سست خاک مساوی است یعنی:

$$s_c = s_s \quad (10)$$

با توجه به معادلات 2، 3 و 9 داریم:

$$\Delta \sigma_{h,geo} = \frac{J \cdot [\Delta r_c - (r_{geo} - r_c)]}{r_{geo}^2} \quad (11)$$

با دخالت دادن معادله 11 در معادله 5 و با استفاده از اختلاف تنشها در معادله 4، تغییر شکلهای افقی ستون را می توان به صورت زیر محاسبه کرد:

$$\Delta r_c = \left(\frac{1}{\frac{E^*}{(1/a_c - 1) \cdot r_c} + \frac{J}{r_{geo}^2}} \right) \cdot \left[K_{a,c} \cdot \left(\frac{1}{a_c} \cdot \Delta \sigma_0 - \frac{1-a_c}{a_c} \cdot \Delta \sigma_{v,s} + \sigma_{v,0,c} \right) - K_{\theta,s} \cdot \Delta \sigma_{v,s} - K_{\theta,s}^* \cdot \sigma_{v,0,s} + \frac{(r_{geo} - r_c)}{r_{geo}^2} \cdot J \right] \quad (12)$$

اما معادله 12، تابع متغییر مجهول $\Delta \sigma_{v,s}$ می باشد. بنابراین با قرار دادن معادلات 9 و 6 در معادله 10، رابطه زیر برای تعیین بخشی از فشار روی لایه سست خاک ($\Delta \sigma_{v,c}$) بصورت زیر بدست آورد:

$$\left\{ \frac{\Delta \sigma_{v,s}}{E_{oed,s}} - \frac{2}{E^*} \cdot \frac{\nu_s}{1-\nu_s} \cdot \left[K_{a,c} \cdot \left(\frac{1}{a_E} \cdot \Delta \sigma_0 - \frac{1-a_E}{a_E} \cdot \Delta \sigma_{v,s} + \sigma_{v,0,c} \right) - K_{\theta,s} \cdot \Delta \sigma_{v,s} - K_{\theta,s}^* \cdot \sigma_{v,0,s} + \frac{(r_{geo} - r_c) \cdot J}{r_{geo}^2} - \frac{\Delta r_c \cdot J}{r_{geo}^2} \right] \right\} \cdot h = \left[1 - \frac{r_c^2}{(r_c + \Delta r_c)^2} \right] \cdot h \quad (13)$$

این رابطه نیز تابع Δr_c می باشد. بنابراین معادلات 12 و 13 باید دوباره حل شوند. با توجه به اینکه حل این معادلات بصورت دستی مشکل و زمان بر می باشد استفاده از یک برنامه کامپیوتری به مصلحت می باشد. $E_{OED,S}$ (constrained modulus) نقش اساسی در معادلات 12 و 13 دارد. بنابراین تعیین مقدار آن با توجه به وابستگی آن به سطح و تنش موجود P^* ، بسیار مهم است. می توان وابستگی تنش با $E_{OED,S}$ را با رابطه زیر ارائه کرد:

$$E_{OED,S} = E_{OED,S}^{ref} \cdot \left(\frac{\sigma^*}{p_{ref}} \right)^n \quad (14)$$

مطابق معادله 4، در مجاورت پوشش ژئوتکستایل یک افزایش تنش وجود دارد، که منجر به افزایش تنش میانگین در لایه خاک سست می گردد. برای برآورد تنش متوسط از رابطه زیر می توان استفاده کرد.

$$\sigma_{1,2}^* = \frac{1}{2} \cdot \left\{ (\Delta\sigma_{v,s} + \sigma_{v,0,s}) + [K_{0,s} \cdot \Delta\sigma_{v,s} + K_{0,s}^* \cdot \sigma_{v,0,s} + \Delta\sigma_{h,Diff}] \right\} + c \cdot \cot \varphi_s \quad (15)$$

در این رابطه σ_1^*

و σ_2^* ، به ترتیب میزان تنش قبل و بعد از تغییر بار گذاری می باشند. تنش متوسط σ^* را می توان از رابطه زیر بدست آورد:

$$\sigma^* = \frac{(\sigma_2^* - \sigma_1^*)}{\ln \left(\frac{\sigma_2^*}{\sigma_1^*} \right)} \quad (16)$$

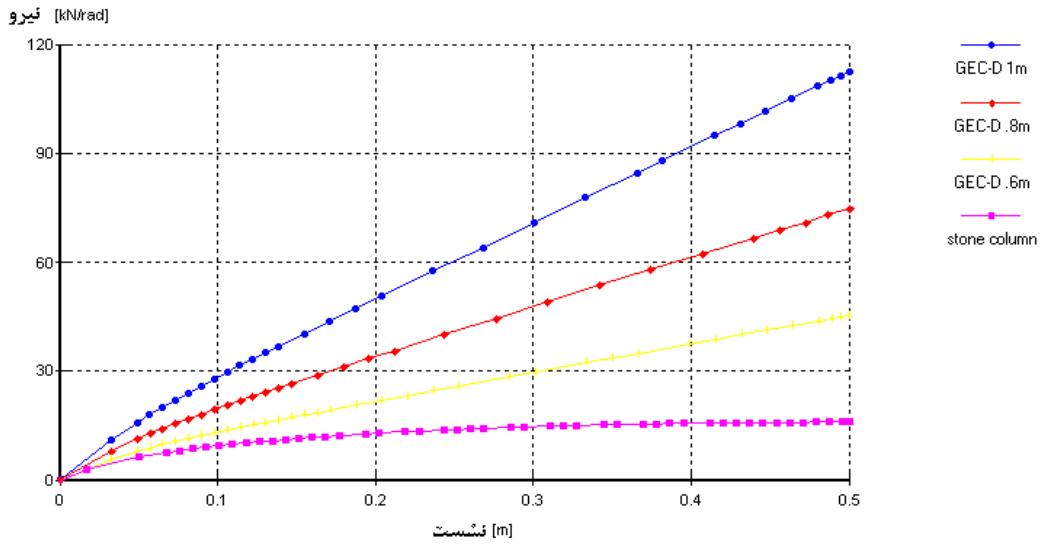
منظور از تنش متوسط عبارت است از: $\sigma^* = (\sigma_2^* + \sigma_1^*) / 2$

آنالیز عددی:

برای در نظر گرفتن اثرات سه بعدی ستون، محیط بصورت متقارن مدل می شود. برای رس مدل soft soil و برای مصالح ستون سنگی مدل موهرکولمب در نظر گرفته می شود. رس را به عنوان مصالح زهکشی نشده و مصالح ستون را بصورت زهکشی شده در نظر می گیریم. برای مدل کردن پوشش ژئوتکستایل از المان ژئوگرید موجود در نرم افزار plaxis استفاده می شود. برای در نظر گرفتن اثر محدود کنندگی ژئوتکستایل مدول مصالح سنگی افزایش داده می شود، که بستگی به قطر ستون دارد. مقادیر پذیرفته شده در این مطالعه براساس آزمایشهای فشار انجام شده توسط آقای Malarvizhi می باشد. برای ارزیابی کرنش کنترل شده از آیشن prescribed settlement موجود در plaxis استفاده می شود. مشخصات مصالح مورد استفاده در این آنالیز در جدول زیر جمع بندی شده اند.

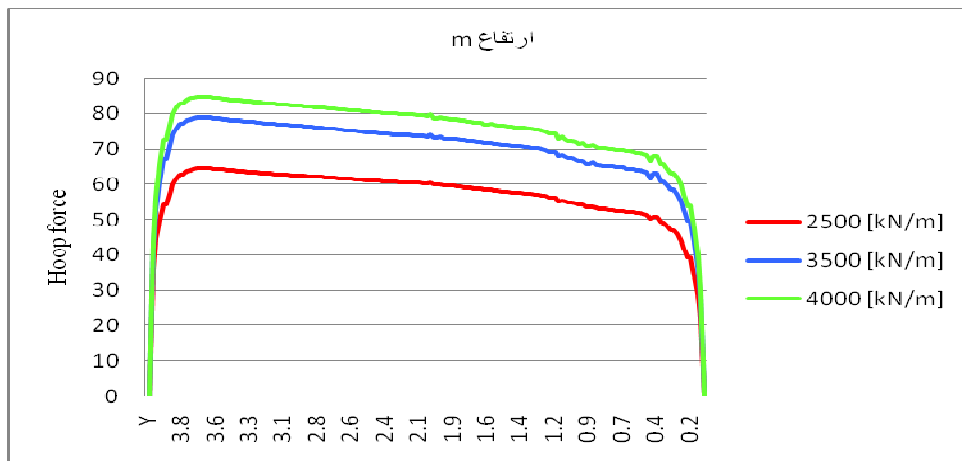
مصالح	γ	K	E	ν	C	φ	ψ	λ	κ
	kN/m ³	m/day	kpa		kpa	°	°		
رس	12	2.39E-04	—	—	4	24	0	.154	.062
ستون سنگی	16	1.0	2500	.35	.1	46	20	—	—
ستون سنگی محصور	16	1.0	4500-9000	.30	.1	46	10	—	—

شکل 4 پاسخ نیرو- نشست ستون محصور با قطرهای 0.6m، 0.8m، 1m و ستون سنگی غیر محصور به قطر 0.8m. را با یکدیگر مقایسه می کند. با توجه به این نمودار اثر استفاده از پوشش ژئوتکستایل در کنترل نشست در خاک سست بدیهی می باشد. همچنین با افزایش قطر ستون تحت یک نیروی مشخص نیز نشست کمتری را متحمل می شویم.

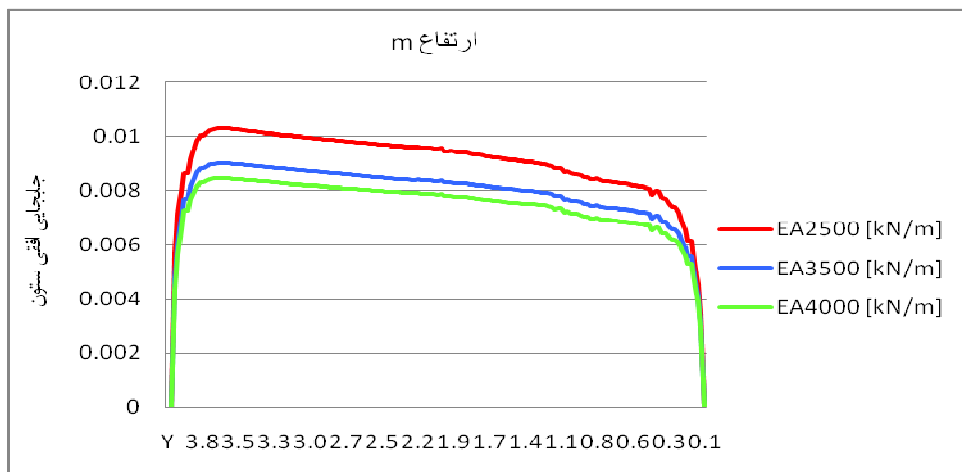


شکل 4 پاسخ نیرو- نشست ستون

مطابق نمودار شکل 5 تنش محیطی ایجاد شده در ستون با افزایش مدول کششی ژئوتکستایل ($EA=2500,3500,4000$) افزایش می یابد و متناسب با آن مطابق شکل 6 با افزایش تنش محیطی جابجایی افقی ستون کاهش می یابد.



شکل 5- تغییرات تنش محیطی ایجاد شده در ستون با تغییر EA



شکل 6- ارتباط جابجایی افقی ستون با تغییر EA

نتیجه گیری:

- بر اساس آنالیز عددی انجام شده نتایج زیر قابل ارائه می باشند:
- عملکرد ستونهای سنگی محصور با ژئوتکستایل بهتر از ستونهای سنگی متداول (با هر قطری) می باشد.
 - با افزایش قطر و مدول کششی ستونها میزان نشست کاهش می یابد.
 - با افزایش مدول کششی ژئوتکستایل نیروی محیطی افزایش می یابد.
 - با افزایش نیروی محیطی جابجای افقی ستون کاهش می یابد.

مراجع:

- 1- S.N. Malarvizhi and K. Ilamparuthi, 2004, Load versus Settlement of Claybed stabilized with Stone & Reinforced Stone columns, Proceedings of the 3rd Asian Regional Conference on Geosynthetics, GEOASIA, Seoul, Korea, 322-329.
- 2- S.N. Malarvizhi, K. Ilamparuthi and S. Bhuvaneshwari, 2005, Finite Element Analysis of Stone columns and Geogrid encased stone columns, Proceedings of the National Conference on Geotechnics in Environmental Protection, VIII 48-51.
- 3- Plaxis Finite Element code for soil and rock analyses, Rotterdam, Balkema.
- 4- M. Raithel, V. Küster 2004, Geotextile-Encased Columns -a foundation system for earth structures, illustrated by a dyke project for a works extension in Hamburg
- 5- Kempfert, H.-G. 2003. Ground improvement methods with special emphasis on column-type techniques. *Int. Workshop on Geotechnics of Soft Soils-Theory and Practice- SCMEP*. Kempfert, H.-G. & Raithel,