

بررسی رفتار لرزه‌ای دیواره‌های رسی مسلح در راهسازی به کمک روش اجزای محدود

مهراب جسمانی، استادیار، دانشکده عمران، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران
سید مجدالدین میرحسینی، دانشیار، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران
بابک بهرامی سربندی، کارشناس ارشد، دانشکده عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اراک، اراک، ایران
E-mail: mehrabjesmani@yahoo.com

چکیده

در این مقاله مدل المان محدود رفتار دیواره‌های خاک مسلح رسی تحت بار زلزله با مطالعه تأثیر مسلح‌کننده‌ها بر کاهش تغییر شکل لرزه‌ای آنها بررسی شده است. برای این منظور یک دیواره مسلح رسی متشکل از سیستم‌های مختلف خاک مسلح به صورت بهینه مدل شده و رفتار تنش- کرنش آن تحت تأثیر یک نوع بارگذاری تیپ، معروف و شناخته شده که مبنای مطالعات بسیاری از پژوهشگران بوده (مانند زلزله سن خوزه)، بررسی شده است. برای ارزیابی میزان تأثیر مسلح‌کننده‌ها در کاهش تغییر شکل دیواره‌ها مقایسه‌ای بین دو سیستم مسلح و غیر مسلح در ارتفاع‌های متفاوت ۶، ۸، ۱۰، ۱۲ و ۱۴ متری انجام و نتایج تحلیل تنش- کرنش و نمودارهای مناسب برای تفسیر آن ارائه شده‌اند. بررسی نتایج به روشنی نشان می‌دهد که سیستم مسلح‌کننده، تغییر شکلهای تاج و وسط دیواره را که قسمتهای بحرانی تحت بار دینامیکی محسوب می‌شوند کاملاً کنترل می‌کند. در نهایت به عنوان نتیجه‌گیری کلی تحقیق حاضر می‌توان بیان کرد که سیستم مسلح‌کننده در دیواره‌های قائم رسی با ارتفاع معمولی تحت بار زلزله می‌تواند تغییر شکلهای افقی را تا ۹۰ درصد کاهش دهد که این مهم در پروژه‌های حمل و نقل می‌تواند سر منشأ اثرات مثبتی در پایدارسازی شیروانیها باشد.

واژه‌های کلیدی: شیروانی خاک مسلح، دیواره‌های پایدار شده، شیروانی مسلح تحت بار زلزله

۱. مقدمه

با ژئوتکستایل ارایه شد. روشهای طراحی ابداع شده در آن زمان برای سیستم تسلیح توسط لی و همکاران [۲] در سال ۱۹۷۳ برای مسلح‌کننده فولادی و دو سال بعد در سال ۱۹۷۵ توسط بل و همکاران [۳] برای مسلح‌کننده‌های پارچه‌ای ارایه شد که بعدها بدنه اصلی روشهای طراحی را تشکیل دادند. کوثرنر در سال ۱۹۸۶ این روشهای طراحی را که براساس تئوری رانکین

در سال ۱۹۶۶ سیستم خاک مسلح با تسمه‌های فولادی توسط یک مهندس فرانسوی به نام هنری ویدال [۱] به جامعه مهندسی ژئوتکنیک معرفی و در دهه ۷۰ میلادی سرمنشأ تحقیقات اولیه در این زمینه شد. آزمایش‌های انجام شده در همان زمان بر روی مواد مختلف، توجه پژوهشگران را نسبت به ژئوتکستایل‌ها جلب کرد و سرانجام توسط یک گروه ژئوتکنیک در سوئد، روش تسلیح خاک

مدل می‌کند [۸، ۹ و ۱۰]. حداکثر شتاب محتمل زلزله یا PGA^2 که در این روش بکار گرفته می‌شود، پارامتر دقیق و کاملاً صحیحی برای شبیه سازی تأثیر حرکت دینامیکی زمین در هنگام زلزله بر بدنه سازه نیست و حاتمی و بتورست با مطالعه پارامترهای مؤثر در رفتار دینامیکی این سازه به این نتیجه رسیدند که شدت حرکت زمین، با تأثیر کمتری، نسبت به پهنا به ارتفاع بدنه مسلح شده، متغیرهای پراهمیتی در رفتار سازه اند [۱۱]. در تحقیق حاضر نرم افزار ANSYS به عنوان یک نرم افزار جامع حل عددی المان محدود برای تحلیل تنش- کرنش انتخاب شده و رفتار شیروانیهای قائم رسی مسلح شده در بازه‌ای از ارتفاع های متداول پروژه های عمرانی و راه و ترابری تحت بار زلزله در مقایسه با شیروانی مشابه غیرمسلح بررسی شد. با حصول اطمینان از پایداری داخلی و خارجی، تغییرشکل به عنوان پارامتر اصلی توصیف رفتار سازه انتخاب شده و مورد مطالعه دقیق قرار گرفته است. در نهایت، نمودارها و جداول مقایسه‌ای برای برآورد و تعیین مقادیر جابجایی‌های افقی در ترازهای مختلف شیروانی در شرایط غیر مسلح و همچنین مسلح شده ارائه شده و در این راستا فرمول‌بندی ریاضی مرتبط با این موضوع به دست آمد.

۲. روش تحقیق

۲-۱ معرفی گام به گام پژوهش انجام شده

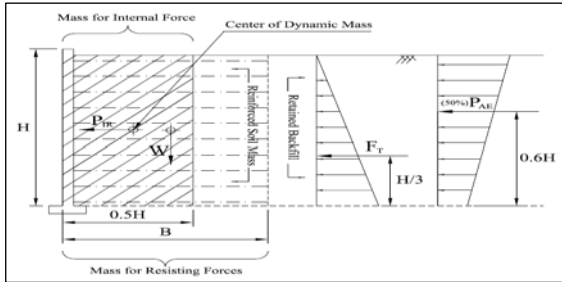
روند کلی تحقیق حاضر به این صورت است که ابتدا با در نظر گرفتن پایداری استاتیکی، یک ترانسه قائم رسی در بازه‌ای از ارتفاعات متداول و مورد استفاده در کارهای اجرایی، ۵ ترانسه قائم رسی که پایداری آنها در شرایط استاتیکی کنترل شده است در نظر گرفته می‌شوند. سپس با استفاده از روش‌های طراحی موجود دیواره‌های مسلح در مقابل بارهای استاتیکی، برای هریک از ترانسه‌ها یک سیستم مسلح کننده از جنس ژئوتکستایل طراحی شده و جهت پایدار کردن آنها در مقابل بار زلزله مبنای طرح، مدل المان محدود آنها در نرم افزار ANSYS تحت تأثیر بار دینامیکی مینا بررسی می‌شود. برای رسیدن به پایداری، هر مرتبه با افزایش طول مسلح کننده‌ها مشخصات مدل تغییر داده شده و مجدداً تحلیل می‌شود تا پایداری مطلوب به دست آید. لازم به توضیح است که به علت تعدد پارامترها، پاره‌ای از آنها از قبیل فواصل ژئوتکستایل‌ها ثابت فرض شده و

پایه‌گذاری شده بود توسعه داد [۴]. ساز و کار عملکرد سیستم معرفی شده خاک مسلح به طور کلی به این ترتیب بود که این سیستم قسمتی از وزن محرک پشت سازه حایل را در مقابل فشار جانبی خاک به عنوان عامل مقاوم بکار می‌گرفت. همین موضوع باعث صرفه جویی در مصرف مصالح و اقتصادی شدن این سیستم به ویژه در پایدار سازی ترانسه‌های مرتفع در پروژه‌های حمل و نقل و راهسازی می‌شد. در ضمن شکست ترانسه مسلح شده، نرم و به کندی صورت می‌گرفت که در عمل فواید بسیاری را در مقابل خرابی‌های ترد و ناگهانی نشان می‌داد. برتری سازه‌ای و اقتصادی این سیستم نسبت به دیوارهای حایل معمولی کاملاً مشهود بوده است.

لازم به توضیح است که شیبه‌های مسلح شده (RSS)^۱ با زاویه شیب ۷۰ تا ۹۰ درجه که از شیبه‌های بسیار متداول در پروژه های راه و راه آهن هستند، در طبقه‌بندی دیواره‌های حایل مسلح (MSEW)^۲ قرار می‌گیرند و می‌توان برای پوشاندن سطح خارجی آنها از پوشش نازک و سبکی استفاده کرد تا ژئوتکستایل را در مقابل عوامل مخرب جوی و محیطی از جمله تجزیه در برابر نور ماورای بنفش محافظت کند [۵]. برتری اصلی خاک مسلح در مقایسه با دیوارهای حایل معمولی، عمدتاً در رفتار لرزه‌ای آنهاست. بنابراین در ده سال گذشته این مورد موضوع جالبی برای پژوهشگران بوده و در این راستا مطالعات درخور اهمیتی انجام شده است. برای جبران کمبود مشاهدات رفتاری شیبه‌ها و دیواره های مسلح تحت بار زلزله، آزمایشهایی با مقیاس کوچک با استفاده از میز ویبره (لرزان) و دستگاه مرکز گریز (سانتریفیوژ) انجام شده و با بررسی و مشاهده رفتار دیواره‌های مسلح آزمایشی ساخته شده در مناطق زلزله خیز، داده‌های اولیه برای مدلسازی سیستم مسلح کننده به دست آمده است که نسل جدید این آزمایش‌ها و مطالعات، در مقالات سالهای اخیر نیز مشاهده می‌شود. بررسیهای حاتمی و بتورست در سال ۱۹۹۸ که با استفاده از روشهای عددی و مدلسازی رفتار خاک مسلح تحت بارگذاری دینامیکی با استفاده از نرم افزار FLAC^۳ انجام شده است، نمونه خوبی از ارزیابی‌های انجام شده بر روی رفتار دیواره‌های مسلح تحت بار زلزله است [۶ و ۷].

لازم به یادآوری است که در استانداردهای طراحی موجود مانند NCMA،^۴ AASHTO^۵ و FHWA^۶ از تحلیل شبه استاتیکی برای پایدار کردن سازه در مقابل بار زلزله استفاده می‌شود که صرفاً با اعمال ضریبی در وزن مرده، بار زلزله را به صورت استاتیکی

وابسته به شتاب جانبی بیشینه زلزله مبنای طرح در جرم بدنه تبدیل به بار استاتیکی معادل شده و بر دیواره مسلح اعمال می‌شود [۱۵]. در بررسی پایداری داخلی با استفاده از روشهای عددی و تحلیل شبه استاتیکی، نیروی اعمال شده بر هر لایه از مسلح کننده‌ها تخمین زده شده و در مقابل، بیرون کشیدگی و پاره شدگی کنترل می‌شود (شکل ۲).



شکل ۲. بارگذاری شبه دینامیکی شیروانی مسلح با روش مونونوبه - اوکابه

در این راستا با استفاده از رابطه (۱) حداکثر ارتفاع پایدار شیروانیهای قائم‌رسی در حالت استاتیکی با ضریب اطمینان مناسب برای چند نوع خاک رس که مشخصات آنها طبق جدول (۱) انتخاب شده اند به دست می‌آید.

$$H_{cr} = \frac{4c}{\gamma} \left[\frac{\cos \phi}{1 - \sin \phi} \right] \quad (1)$$

که در آن :

c : چسبندگی خاک شیروانی

ϕ : ضریب اصطکاک داخلی خاک

γ : وزن واحد حجم خاک

H_{cr} : ارتفاع بحرانی شیروانی

SF : ضریب اطمینان پایداری شیروانی

H : ارتفاع پایدار شیروانی با ضریب اطمینان مناسب

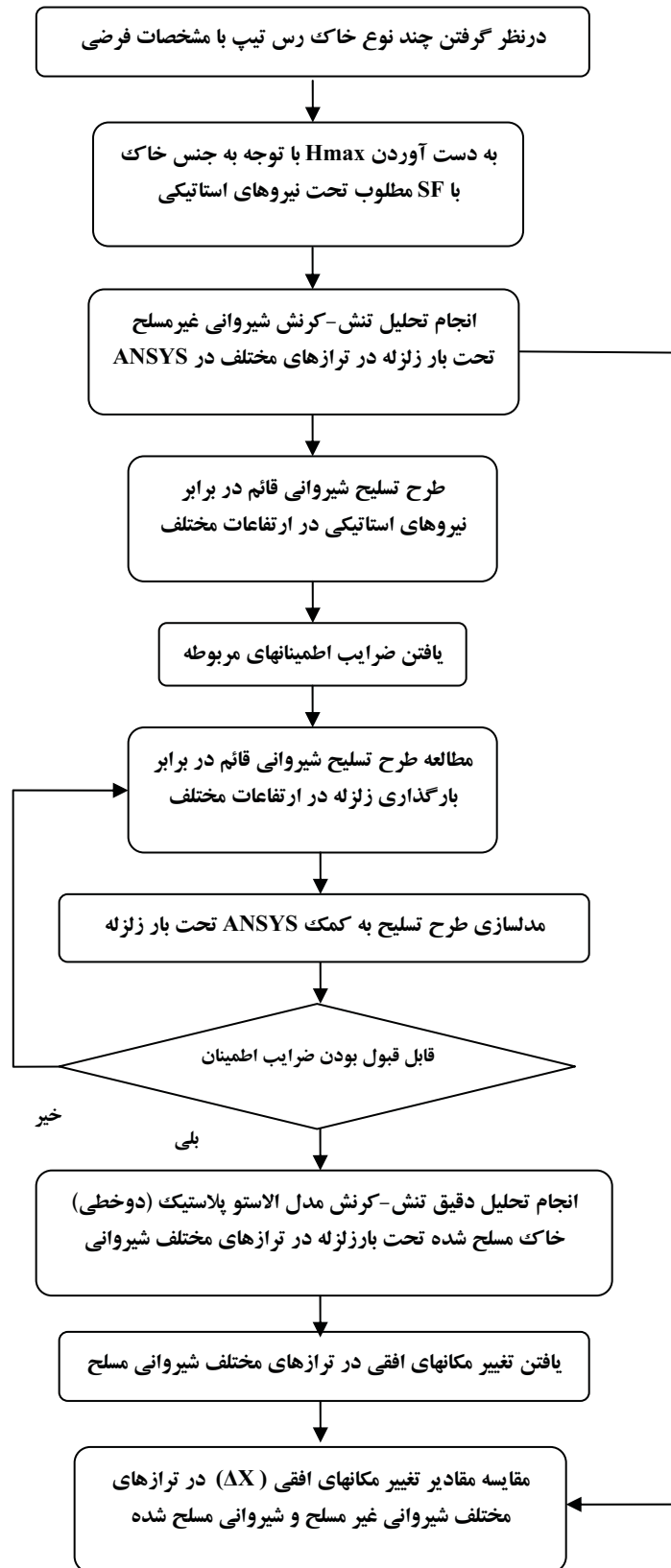
انتخاب پارامترها بر مبنای خاک چسبنده رسی همراه با مقداری درشت دانه ماسه‌ای و بعضاً شنی و در شرایط کاملاً طبیعی، و در عین حال غیر اشباع بوده است. لازم به توضیح است که مبنای انتخاب خواص خاک در این جدول، بررسی تعداد قابل توجهی از شیروانیهای رسی نسبتاً سست و ناپایدار در محورهای جاده‌ای و ارتباطی کشور به ویژه در مناطق شمالی و استان مازندران بوده است. برای مسلح کردن شیروانی در شرایط تقریباً بهینه، بسته به ارتفاع در نظر گرفته شده، انواع مختلف ژئوتکستایل با مقاومت کششی بین ۴۵ تا ۱۰۵ KN/m انتخاب شده و ویژگیهای استاندارد ژئوتکستایل‌های انتخاب شده برای هر شیروانی در جدول ۲ آورده شده است.

پاره‌ای دیگر تغییر داده شده‌اند. با استفاده از نتایج به دست آمده از روش طراحی، ضرایب اطمینان لازم برای پایداری دینامیکی به گونه‌ای به دست می‌آیند که بر اساس روش تحلیل شبه استاتیکی مقدار آن در نهایت نزدیک به یک الی ۱/۲ باشد و سرانجام با برآورد دقیق میزان جابجایی‌ها در مدل المان محدود ترانسه‌های قائم مسلح شده و غیر مسلح، تأثیر مسلح کننده در رفتار تغییر مکانی دیواره‌های قائم رسی در بازه ای از ارتفاعهای متداول بررسی می‌شود (شکل ۱).

۲-۲ روش طراحی دیواره‌های مسلح

همزمان با گسترش روز افزون استفاده از دیواره‌های مسلح روشهای طراحی گوناگونی ابداع و معرفی شده‌اند. بررسی و مقایسه این روشها نشان می‌دهد که یک روش طراحی مناسب باید شامل مراحل زیر باشد [۱۲]:

- تحلیل تنش تحت بارهای سرویس
 - تحلیل تعادل حدی (پایداری داخلی و پایداری خارجی)
 - ارزیابی تغییرشکلها
- تحلیل تنش، گزینه‌ای از محل مسلح کننده‌ها و کنترل تنش در توده مسلح شده را نتیجه داده و در ضمن پایداری موضعی در تراز هر مسلح کننده را نیز بررسی می‌کند. تحلیل تعادل حدی پایداری کلی توده مسلح شده اعم از پایداری خارجی و داخلی را کنترل می‌کند. در کنترل پایداری خارجی، توده مسلح شده به صورت یکپارچه در نظر گرفته شده و صفحات گسیختگی مختلف در اشکال گوناگون، خرابی کلی توده مسلح شده را مورد مطالعه قرار می‌دهد. تحلیل پایداری داخلی، صفحات گسیختگی را داخل توده مسلح شده فرض می‌کند و لازم به توضیح است که در بعضی از موارد صفحه بحرانی شکست، قسمتی در بدنه مسلح شده و قسمتی در خارج آن اتفاق می‌افتد [۱۳]. در تحلیل شیروانیهای مسلح تحت بارگذاریهای دینامیکی مانند زلزله و انفجار، نیروها معمولاً به صورت شبه استاتیکی در نظر گرفته می‌شوند.
- روش طراحی بر اساس بیشینه شتاب افقی زلزله مبنای منطقه برای رسیدن به پایداری داخلی و خارجی پایه گذاری شده است و در تحلیل پایداری خارجی یک نیروی جانبی اضافی از جانب خاک مهار شده به دیواره مسلح وارد می‌شود و در عین حال جرم بدنه مسلح شده خود تحت تأثیر نیروی اینرسی جانبی قرار می‌گیرد [۱۴]. به عبارت دیگر در روشهای متداول طراحی از تحلیل شبه استاتیکی^۸ برای این گونه بارگذاریها استفاده می‌شود که با استفاده از روش مونونوبه - اوکابه^۹ بارگذاری دینامیکی با اعمال ضریبی



شکل ۱. روند کلی پژوهش انجام شده

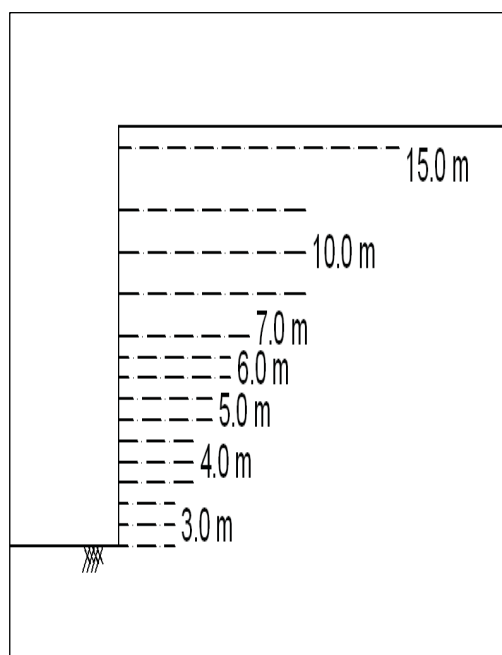
جدول ۱. مشخصات و خواص مصالح شیروانیهای مورد بررسی

c	ϕ	γ	E	H_{cr}	S.F.	H
(kN/m^2)	($^\circ$)	(kN/m^3)	(MN/m^2)	(m)		(m)
30	10	20	30	7.15	1.19	6
40	10	20	40	9.53	1.19	8
50	10	20	50	11.92	1.19	10
60	10	20	60	14.30	1.19	12
70	10	20	70	16.68	1.19	14

جدول ۲. خصوصیات مسلح کننده شیروانیها از جنس ژئوتکستایل

ارتفاع شیروانی (m)	وزن واحد سطح (gr/m^2)	ضخامت (cm)	مقاومت کششی در جهت طولی (KN/m)	کرنش بیشینه (%)	اندازه حفره‌ها (mm)	گذردهی آب در جهت طولی ($lit.m^2/s$)
6	170	1	45	10	0.07	0.3
8	250	1	60	10	0.07	0.3
10	300	1	70	10	0.07	0.3
12	500	1	125	10	0.07	0.3
14	400	1	105	10	0.07	0.3

شکل ۳. برش قائم شیروانی مسلح شده ۱۰ متری



جدول ۳. طرح تسلیح شیروانی ۶ متری تحت بارگذاری زلزله سن خوزه

Z (m)	S_v (m)	L(m)	FS(B)	FS(P)
1.50	1.50	12.00	3.55	4.50
2.50	1.00	7.00	3.19	3.37
3.40	0.90	6.00	2.61	3.521
4.10	0.70	5.00	2.78	4.04
4.70	0.60	4.00	2.83	4.02
5.30	0.60	3.00	2.23	3.33
5.65	0.35	2.00	4.03	4.04
6.00	0.30	1.50	3.80	3.55

جدول ۴. طرح تسلیح شیروانی ۸ متری تحت بارگذاری زلزله سن خوزه

Z (m)	SV(m)	L(m)	FS(B)	FS(P)
1.50	1.50	13.00	4.70	4.17
2.50	1.00	10.00	4.26	4.46
3.50	1.00	8.00	3.04	3.50
4.30	0.80	7.00	3.09	4.04
5.00	0.70	6.00	3.04	4.12
5.60	0.60	5.00	3.17	3.43
6.10	0.50	4.00	3.49	3.99
6.60	0.50	4.00	3.22	4.68
7.10	0.50	3.00	3.00	3.72
7.55	0.45	2.00	3.13	3.00
8.00	0.45	1.00	3.00	3.68

جدول ۶. طرح تسلیح شیروانی ۱۲ متری تحت بارگذاری زلزله سن خوزه

Z (m)	SV(m)	L(m)	FS(B)	FS(P)
2.00	2.00	20.00	5.55	4.82
3.50	1.50	15.00	4.23	4.34
4.50	1.00	12.00	4.93	4.73
5.50	1.00	12.00	4.03	5.43
6.50	1.00	12.00	3.41	6.13
7.30	0.80	10.00	3.80	6.24
8.00	0.70	8.00	3.96	5.51
8.50	0.50	6.00	5.22	5.03
9.00	0.50	6.00	4.93	5.78
9.50	0.50	5.00	4.67	4.82
10.00	0.50	5.00	4.44	5.51
10.40	0.40	3.50	5.33	4.47
10.80	0.40	3.00	5.13	4.13
11.20	0.40	3.00	4.95	4.83
11.60	0.40	2.50	4.78	4.50
12.00	0.40	2.50	4.62	5.18

جدول ۵. طرح تسلیح شیروانی ۱۰ متری تحت بارگذاری زلزله سن خوزه

Z (m)	SV(m)	L(m)	FS(B)	FS(P)
1.50	1.50	15.00	5.12	4.35
2.50	1.00	10.00	4.61	3.07
3.50	1.00	10.00	3.30	3.77
4.50	1.00	10.00	3.00	4.46
5.00	0.50	7.00	4.61	4.67
5.50	0.50	6.00	4.20	3.00
6.00	0.50	6.00	3.85	4.38
6.60	0.50	5.00	3.55	3.42
7.00	0.50	5.00	3.30	4.12
7.50	0.50	4.00	3.10	3.15
8.00	0.50	4.00	3.00	3.85
8.50	0.50	4.00	2.70	4.55
9.00	0.50	3.00	2.65	3.58
9.50	0.50	3.00	2.60	4.28
10.00	0.50	3.00	2.55	4.97

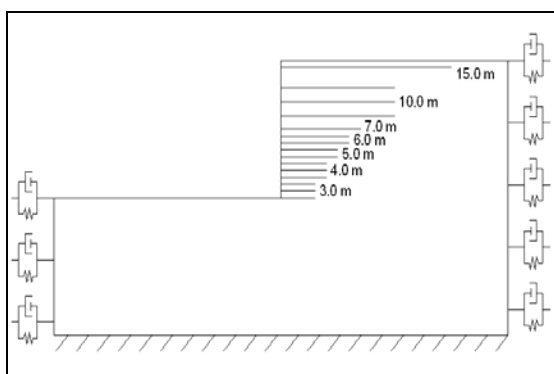
جدول ۷. طرح تسلیح شیروانی ۱۴ متری تحت بارگذاری زلزله سن خوزه

Z (m)	SV(m)	L(m)	FS(B)	FS(P)
1.80	1.80	25	5.75	6.81
3.00	1.20	18	5.18	6.50
4.00	1.00	15.5	4.66	5.89
5.00	1.00	14.50	3.73	5.77
5.80	0.80	12.00	4.01	5.31
6.60	0.80	12.00	3.53	6.00
7.30	0.70	10.00	3.65	5.18
8.00	0.70	10.00	3.32	5.88
8.50	0.50	8.00	4.38	5.61
9.00	0.50	8.00	4.14	6.31
9.50	0.50	8.00	3.92	7.00
10.00	0.50	7.00	3.73	6.05
10.40	0.40	6.00	4.48	6.14
10.80	0.40	5.00	4.31	5.00
11.20	0.40	5.00	4.16	5.50
11.60	0.40	5.00	4.00	6.18
12.00	0.40	5.00	3.88	6.88
12.40	0.40	4.00	3.75	5.51
12.80	0.40	4.00	3.64	6.21
13.10	0.30	3.00	4.74	6.20
13.40	0.30	3.00	4.63	6.84
13.70	0.30	2.00	4.53	4.93
14.00	0.30	2.00	4.44	5.53

مناسبتی از تغییرات تنش کششی نسبت به تغییرات طولی کششی این رفتار را تبیین کرد. طرح تسلیح پایدار شیروانیهای ۶، ۸، ۱۰، ۱۲ و ۱۴ متری با مشخصات ذکر شده تحت بار دینامیکی زلزله سن خوزه در جداول ۳ تا ۷ ارائه شده است که در شکل ۳ به صورت شماتیک و به عنوان مثال برای شیروانی ۱۰ متری نمایش داده شده است. همان‌گونه که دیده می‌شود برخلاف روش‌های طراحی که برای ساده سازی از سیستم مسلح کننده با طولهای یکنواخت استفاده می‌شود، نتیجه طراحی حاضر ساز و کار مثلثی شکل را پیشنهاد می‌کند که به نوعی شرایط تحلیل و طراحی بهینه را ارضاء می‌کند.

۲-۳ مدل‌سازی و تحلیل المان محدود

نظر به این که محیط مورد بررسی فاقد مؤلفه‌های کرنش در جهت امتداد طولی شیروانی است بنابراین مدل‌سازی المان محدود شیروانیهای مذکور در شرایط کرنش مسطح دو بعدی انجام گرفت. همچنین در این پژوهش محدوده متعارف شیروانیها شامل ارتفاع‌های ۶، ۸، ۱۰، ۱۲ و ۱۴ متری مورد بررسی قرار گرفت که برای تشریح مدل المان محدود در این بند، به منظور جلوگیری از افزایش حجم بیش از حد شکلها و نمودارهای ارائه شده، به عنوان مثالهای نمونه و تیپ، نتایج مربوط به شیروانی ۱۰ متری ارائه می‌شوند (شکل ۴).



شکل ۴. نمای شماتیک هندسه مدل دیواره قائم رسی ۱۰ متری

در این شکل محیط دو بعدی مدل شده همراه با طراحی بهینه سیستم خاک مسلح دیده می‌شود که شرایط مرزی مورد استفاده نیز در آن نشان داده شده است. همان‌طور که قبلاً ذکر شد در این پژوهش مؤلفه‌های افقی تغییر مکانها، مورد بررسی و ارزیابی

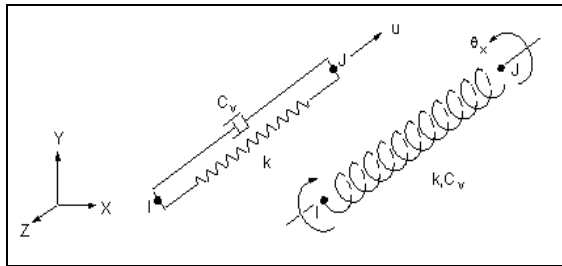
پارامترهای بکار رفته در عناوین جداول طراحی به شرح زیرند:

ضریب اطمینان در برابر بیرون کشیدگی مسلح کننده	FS(P) :
ضریب اطمینان در برابر پاره شدگی مسلح کننده	FS(B) :
طول مسلح کننده	L :
فاصله قائم مسلح کننده	S _v :
عمق قرارگیری مسلح کننده	Z :

برای طرح تسلیح شیروانی، به منظور پایداری در برابر بار زلزله مورد بررسی، از روش سعی و خطا استفاده شده است. به این ترتیب که ابتدا با استفاده از روش بل، طرح تسلیح شیروانی همراه با ضریب اطمینان در مقابل گسیختگی مسلح‌کننده FS(B) و همچنین ضریب اطمینان در مقابل بیرون کشیدگی مسلح‌کننده FS(P) برای پایدار کردن شیروانی در برابر بارگذاری دینامیکی زلزله سن خوزه ارائه شده است. توضیح آن که شتابناگشت زلزله سن خوزه به کمک دستگاه ثابتی بسیار نزدیک به کانون زلزله، ثبت شده (فاصله حدود ۱۲ کیلومتر) و از این نظر منحنی‌های مربوط به این زمین لرزه دقت زیادی در ثبت داشته‌اند و بنابراین، این زلزله مورد توجه بسیاری از پژوهشگران قرار داشته و مبنای مطالعات متعددی بوده است [۱۶]. سپس این طرح توسط مدل رایانه‌ای با نرم‌افزار ANSYS همانندسازی شده و تحت بار زلزله سن خوزه قرار گرفته است و هر بار در صورت ناپایدار بودن شیروانی طرح تسلیح شیروانی به روش بل با استفاده از ضرایب اطمینان FS(B) و FS(P) بالاتری صورت گرفته و مجدد توسط مدل رایانه‌ای همانندسازی شده و تحت بار دینامیکی زلزله سن خوزه قرار گرفته است، این روند تا جایی که مدل رایانه‌ای به وضعیتی پایدار برسد به صورت سعی و خطا تکرار شده تا سرانجام با پایدار شدن مدل رایانه‌ای ضرایب اطمینان مناسب به دست آمدند. لازم به توضیح است که نرم‌افزار ANSYS به دلیل گستردگی فراوان در تعریف المانهای تماسی متعدد از نظر مدل‌سازی خاک مسلح و تبیین رفتار تماسی میان خاک و عناصر مسلح‌کننده بسیار انعطاف پذیر بوده و از این نظر قابلیت‌های بسیار زیادی دارد و می‌تواند رفتار میان خاک و مسلح‌کننده را به خوبی مدل کند، که در این مقاله از المان contact 12 استفاده شده است. همچنین با توجه به این که در ژئوتکنستابل‌ها منحنی بار-کش آمدگی اهمیت ویژه دارد در برنامه ANSYS می‌توان با تعریف

COMBIN14 - Spring- / میراگر - ۲-۳-۲ المان فنر - میراگر - Damper

المان Spring-Damper مطابق شکل از المانهای دویعدی و دو گرهی است. این المان توانایی مدل کردن فنر طولی و فنر پیچشی را دارد. المان SPD جرم ندارد و با تعریف کردن یک المان جرمی می‌توان جرم آنرا شبیه سازی کرد. ورودی‌های پارامتریک المان SPD ضریب ارتجاعی فنر توسط پارامتر (K) و ضریب میرایی میراگر المان توسط ضرایب میرایی خطی (CV1) و غیرخطی (CV2) هستند. در این تحقیق برای تعیین ضریب ارتجاعی فنر، از مفهوم ضریب ارتجاعی خاک همراه با جداول و نمودارهای تجربی ارایه شده توسط Barkan [۱۸] استفاده شده است. ضرایب میرایی که برای بارگذاری‌های استاتیکی کارآیی ندارند، در بارگذاری دینامیکی از جدول ارایه شده [۱۹] مشخص و تعریف شدند (شکل ۶). در این المان مقادیر میرایی مطلقاً به گونه‌ای بوده که اثرات برگشت موج قابل چشم پوشی باشند.



شکل ۶. المان دو گرهی و دو نقطه ای COMBIN14

۲-۴ بارگذاری

بارگذاری انجام شده بر روی شیروانیها از نوع بارگذاری دینامیکی گذرا^{۱۲} است که بر اساس بار دینامیکی ناشی از زلزله سن خوزه بر روی مدل اعمال شده است. برای اعمال بار دینامیکی مورد نظر به محیط، گزینه بارگذاری لحظه‌ای^{۱۲} مورد استفاده قرار گرفته که گاهی اوقات تحلیل تاریخچه زمانی نیز اطلاق می‌شود. لازم به توضیح است که بارگذاری زلزله سن خوزه یکی از انواع بارگذاری تیپ زلزله است که در مراجع مختلف، مطالعات گسترده‌ای بر روی آن انجام شده و در عین حال پایه مطالعات پر شمار بعدی نیز بوده است [۲۰]. بنابراین در این پژوهش، این زلزله به صورت تاریخچه زمانی برای اعمال بار دینامیکی بر مدل انتخاب شد (شکل ۷).

قرار گرفته و طبیعی است که با دور شدن از محیط، به دلیل میرایی هندسی، این حرکات افقی تدریجاً مستهلک می‌شوند. ساده‌ترین راه حل برای در نظر گرفتن اثرات این میرایی، دور کردن هرچه بیشتر مرزهاست که اثرات ارتعاشی کمی به مرزها برسد.

این راه حل دو مشکل اساسی در پی دارد:

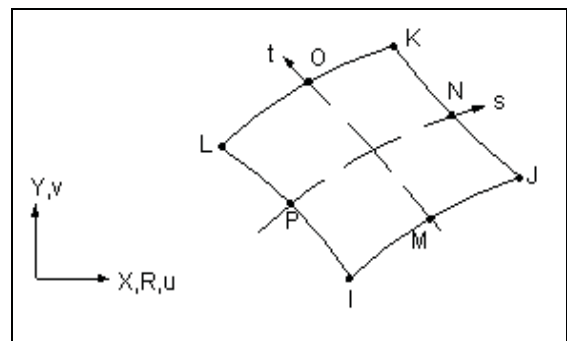
الف- بزرگ شدن ناحیه مورد مطالعه که تعداد المانها، گره‌ها و به تبع آن، درجات آزادی سیستم و عملاً حجم محاسبات را بسیار افزایش می‌دهد و در نتیجه منجر به طولانی شدن تحلیل رایانه‌ای می‌شود.

ب- به هر حال در نظرگیری مرزهای صلب جانبی هرچند در دور دستها مشکل برگشت امواج از مرزها به درون محیط را پدید آورده و در نهایت شرایطی ناخواسته از رفت و برگشت مکرر موج در محیط را به وجود می‌آورد.

از این رو برای احتراز از دو مشکل اساسی فوق مرزهای جانبی که در ارتباط مستقیم با تغییر مکانهای افقی هستند به صورت المانهای فنر- میراگر تعریف شدند. در نهایت کل محیط با دو دسته المانهای کرنش مسطح^{۱۱} و فنر- میراگر^{۱۱} همراه با المانهای تماسی مربوطه المان بندی شد [۱۷].

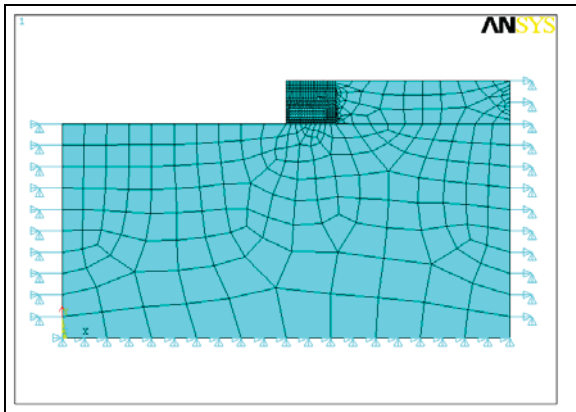
۲-۳-۱ المان کرنش مسطح / PLANE82 - 2D 8

المان plane 82 از المانهای دو بعدی چهار وجهی است که می‌تواند به راحتی در شبکه بندی‌های چهارگوش با تفاوت سایزهای زیاد بدون آنکه کاهش دقت زیادی را باعث شود به کار رود. این المان ۸ گرهی، جابجایی‌ها و تغییر مکانها را به خوبی مدل می‌کند و همچنین در حالات مرزی رفتار خوبی از خود نشان می‌دهد. این المان توسط ۸ گره معرفی می‌شود که هر گره در دو جهت X و Y دارای درجه آزادی است. همچنین این المان توانایی مدل کردن رفتار پلاستیک را نیز دارد (شکل ۵).



شکل ۵. المان ۸ گرهی و دو بعدی PLANE82

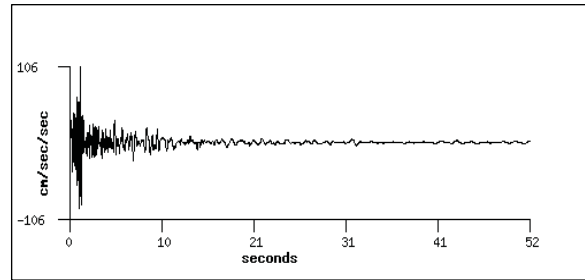
محدود می‌کند. البته تاکنون ضوابط خاصی برای کنترل تغییر شکلها به طور خاص برای دیواره‌های مسلح شده پیشنهاد نشده و کنترل تغییر شکل، صرفاً با ضوابط مربوط به دیوارهای حایل وزنی که رفتارشان به دیواره‌های مسلح شده شباهت دارد انجام می‌شود. البته این نکته قابل گفتن است که دیوارهای حایل وزنی به صورت صلب جابجا می‌شود، در صورتی که دیواره‌های مسلح در ارتفاع، تغییر شکل نسبی موضعی نیز دارند که باید در روش طراحی کنترل شود. لازم به توضیح است که با توجه به ماهیت دینامیکی بارهای زلزله و تغییرات مقدار بار نسبت به زمان، طبیعی است که مقادیر δ_x که معرف تغییر مکان افقی است نیز دارای تغییرات عمده‌ای نسبت به زمان باشد. همچنین δ_x در نقاط مختلف محیط نیز فرق می‌کند و بنابراین عملاً δ_x به عنوان یک تابع دو متغیره از زمان و مکان قابل بررسی است. همچنین به دلیل در نظر گرفتن دو حالت شیروانی غیرمسلح و مسلح عملاً دیده می‌شود که متغیر سومی به عنوان مسلح کننده (بود یا نبود آن) نیز در مقدار δ_x دخیل است. بنابراین برای بررسی بهتر، این کمیت یعنی δ_x به عنوان یکی از اصلی‌ترین و مهم‌ترین پارامترهای رفتاری خاک شرایط ویژه و تعریف شده‌ای برای متغیرها در نظر گرفته شد.



شکل ۸. مدل مش بندی شده دیواره رسی قائم ۱۰ متری

۳-۱ وضعیت متغیر زمانی

بار زلزله وارده، یک دوره زمانی مشخص و برابر با ۵۲ ثانیه دارد که پس از آن با توجه به میرایی در نظر گرفته شده محیط تا مدتی به ارتعاش خود ادامه می‌دهد. در مطالعه برای به دست آوردن δ_x در گامهای زمانی مختلف مقدار این کمیت طی تحلیل‌های لازم به دست آمده و بیشینه مقدار آن در نظر گرفته شد که به طور کلی



شکل ۷. بارگذاری تاریخچه زمانی زلزله سن خوزه

۳. مطالعه رفتار تنش-کرنش شیروانیهای قائم

غیر مسلح و مسلح

بر اساس نظریه‌های موجود در مبحث پایداری شیروانیها، شیروانیهای قائم رسی مورد مطالعه، به گونه‌ای در نظر گرفته شدند که با توجه به جنس آنها در حالت استاتیکی و غیرمسلح با ضریب اطمینانی قدری بزرگ‌تر از یک پایدار بوده‌اند. طبیعی است این شیروانیها در شرایط بارهای زلزله دچار تغییر شکلهای بزرگ شده که ناپایدار خواهند بود (و مقادیر آنها به کمک برنامه ANSYS به دست آمد). در عین حال به کمک مسلح سازی این شیروانیها ضریب اطمینان آنها در برابر بارهای استاتیکی افزایش یافته و سپس تحت بارهای زلزله مجدداً رفتار آنها و تغییر شکلهای مربوطه به کمک برنامه ANSYS به دست آمد که به دلیل نقش عناصر مسلح کننده در کنترل و محدود ساختن تغییر شکلها، مقادیر کنترل شده و کمی برای جابجایی‌ها در راستای X به دست آمدند که پایداری شیروانی را کاملاً تضمین می‌کنند. در نهایت مقایسه‌ای نیز میان این دو دسته تغییر شکل (جابجایی‌های افقی تحت بارگذاری زلزله با و بدون مسلح کننده) در ترازهای مختلف شیروانی به عمل آمد و نقش عناصر مسلح کننده در پایین آوردن جابجایی‌ها و حفظ پایداری شیروانی بررسی شد. لازم به توضیح است که برای مدلسازی محیط از المانهای معرفی شده در بند ۲ استفاده شده که به عنوان نمونه در شکل ۸ مدل مش بندی شده دیواره قائم رسی ۱۰ متری نشان داده شده است [۲۱]. با توجه به نتیجه تحلیل‌ها دیده می‌شود که در شیروانیهای مسلح شده، اثر سیستم مسلح کننده در رفتار تحت بارگذاری دینامیکی کاملاً مشهود بوده و علاوه بر تعدیل تنشها و ممانعت از بروز تمرکز تنشهای بسیار حاد موجب توزیع مناسب و تعدیل یافته تنش در توده خاک شده، در عین حالت غیرمکانهای افقی را در حیطه قابل قبولی حفظ و

نتایج تحلیلها نشان داده که δ_x (max) در زمانی که بار زلزله (متناسب با شتاب زمین) حداکثر بوده، اتفاق افتاده است.

۳-۲ وضعیت متغیر مکانی

آشکار است که برای تعریف δ_x باید نقاط مشخصی مد نظر قرار گیرند و از این روی دیواره آزاد شیروانی منظور شده و برای تکمیل بررسی، سه نقطه در بالا، وسط و پایین شیروانی (مثلاً برای شیروانی ۱۰ متری در بالای ارتفاع ۱۰ متری، ۵ متری و کف شیروانی) مورد ارزیابی قرار گرفتند.

۳-۳ وضعیت تسلیح

سرانجام با مشخص شدن تکلیف متغیرهای زمانی (لحظه ای که بیشینه δ_x رخ می دهد) و متغیرهای مکانی (نقاط بالا، میانی و پایین شیروانی) در دو حالت خاک مسلح و غیر مسلح، مقادیر δ_x به دست آمده و با هم مقایسه شده اند. بنابراین به عنوان نمونه در شکل ۹ کانتورهای تغییر شکل δ_x در یک گام زمانی مشخص برای شیروانی مسلح شده ۱۰ متری دیده می شود.

پارامتر بی بعد برای ارزیابی میزان کاهش تغییر شکل در روش طراحی حاضر برای دیواره های مسلح معرفی می شود. این پارامتر به گونه ای تعریف شده که تأثیر سیستم مسلح کننده پیشنهاد شده در این روش طراحی را در زمان و نقاط تعریف شده مورد ارزیابی قرار دهد. پارامتر درصد کاهش جابجایی در جهت افقی به صورت زیر تعریف می شود:

$$\Delta(\delta_{X_{max}})\% = \frac{|\delta_{X_{NRmax}}| - |\delta_{X_{Rmax}}|}{|\delta_{X_{NRmax}}|} \times 100 \quad (2)$$

که در آن:

$$\Delta(\delta_{X_{max}})\%:$$

شاخص کاهش جابجایی افقی حالت مسلح نسبت به حالت غیرمسلح

$$\delta_{X_{NRmax}}:$$

بیشینه تغییر مکان افقی در یک تراز مشخص برای حالت غیرمسلح

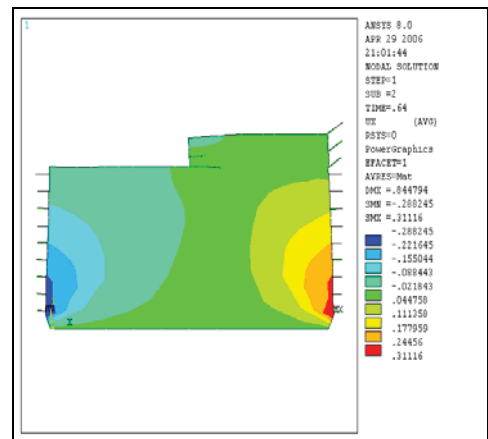
$$\delta_{X_{Rmax}}:$$

بیشینه تغییر مکان افقی در همان تراز برای حالت مسلح

۴-۲ بررسی نتایج تحلیل های انجام شده از نظر کمی

برای تعیین کمیت شاخص کاهش جابجایی افقی که مهم ترین شاخص معرف برای اثرات طرح تسلیح است مقادیر $\delta_{X_{max}}$ (در بحرانی ترین زمان که غالباً بر زمان نظیر شتاب حداکثر منطبق بوده) در سه نقطه تاج، نیمه ارتفاع شیروانی و پاشنه آن از نتایج حاصل از تحلیل های رایانه ای استخراج و در جدول ۸ ارایه شده است. این جدول ۵ ستون دارد که از سمت راست ستون اول ارتفاع های مورد مطالعه، ستون دوم معرفی موقعیت نقاط در دیواره شیروانی، ستون سوم حداکثر جابجایی شیروانی غیر مسلح، ستون چهارم حداکثر جابجایی شیروانی مسلح و ستون آخر درصد کاهش جابجایی افقی آورده شده اند.

نتایج این جدول نشان می دهد که در شرایط غیر مسلح به طور کلی مقادیر δ_x بسیار زیاد و در محدوده ۳۰ تا ۵۷cm است که نشان از بروز تغییر شکلهای بزرگ در حد خرابی برای شیروانیها دارد، در حالی که در شیروانیهای مسلح مقادیر δ_x به دامنه ۰/۶cm تا حداکثر ۶/۶cm محدود شده که در محدوده



شکل ۹. کانتورهای کرنش گرهی دیواره رسی ۱۰ متری

۴. مقایسه رفتار تغییر مکانی شیروانیهای مسلح و غیرمسلح در بارگذاری دینامیکی

غیرمسلح در بارگذاری دینامیکی

۴-۱ معرفی شاخص کاهش جابجایی افقی کاهش

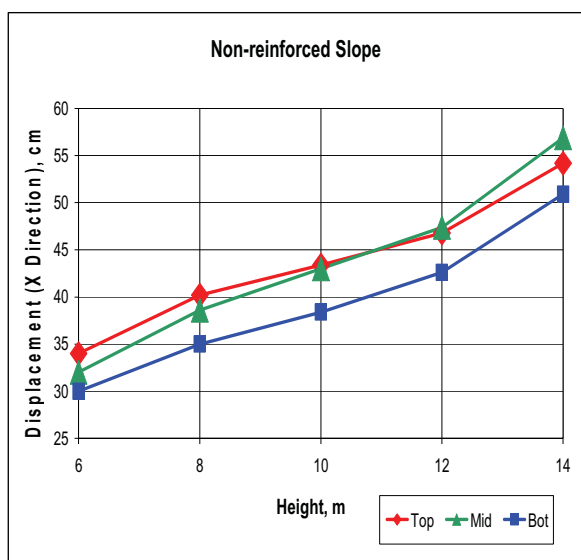
در این بخش برای ارزیابی اثر مسلح کننده ها بر یکی از مهم ترین کمیت های رفتاری خاک حین زلزله (یعنی جابجایی های افقی) یک

مشاهده می‌شود به دلیل استفاده از مسلح کننده‌ها در شرایط بهینه، مقدار $\Delta(\delta_{Xmax})\%$ بین ۸۱٪ و ۹۹٪ کاهش داشته است که خود نشانگر نتایج بسیار قابل قبولی در کنترل تغییر شکلهاست.

کم و قابل قبولی قرار داشته و پایداری شیروانی حین زلزله را تضمین می‌کند. همچنین با توجه به رابطه (۲) مقادیر $\Delta(\delta_{Xmax})\%$ در آخرین ستون جدول ۸ نشان داده شده است که

جدول ۸. پارامتر درصد کاهش جابجایی در جهت افقی

ارتفاع (m)	موقعیت	شیروانی مسلح نشده $\delta_{XNRmax}(cm)$	شیروانی مسلح $\delta_{XRmax}(cm)$	فاکتور کاهش جابجایی $\Delta(\delta_{Xmax})\%$
6	Bottom	30	3.2	89.33
	Middle	32	1.8	94.38
	Top	34	0.76	97.76
8	Bottom	35	6.6	81.14
	Middle	38.6	4.8	87.56
	Top	40.2	3.4	91.54
10	Bottom	38.4	5.9	84.64
	Middle	43	2.3	94.65
	Top	43.4	1.8	95.85
12	Bottom	42.6	2.8	93.43
	Middle	47.4	1.8	96.20
	Top	46.8	2.5	94.66
14	Bottom	50.9	1.29	97.47
	Middle	56.9	1.3	97.72
	Top	54.2	0.6	98.89



شکل ۱۰. روند کلی تغییر مکانهای حداکثر افقی δ_{XNRmax} در شیروانی غیرمسلح

۳-۴ بررسی روند عمومی نتایج تحلیل های انجام شده ۱-۳-۴ بررسی تغییرات δ_{XNRmax} نسبت به ارتفاع شیروانی غیرمسلح

به منظور بررسی روند کلی مقادیر δ_{XNRmax} در حالت غیرمسلح در شیروانی‌ها با ارتفاعهای مختلف نموداری ارائه شده که در آن تابع اصلی δ_{XNRmax} در محور قائم و ارتفاع شیروانی در محور افقی دیده می‌شود (شکل ۱۰). همان طور که در شکل دیده می‌شود به طور کلی روند افزایش δ_{XNRmax} نسبت به ارتفاع تقریباً خطی بوده و همچنین نقاط تاج شیروانی جابجایی‌های بیشتری نسبت به نقاط میانی و پاشنه شیروانی دارند، ضمن آن که مقدار δ_{XNRmax} در پاشنه شیروانی، کمتر (به دلیل گیرداری پاشنه شیروانی و محدودیت حرکتی آن) و در نقاط میانی و بالایی، بیشتر (بدلیل شرایط طره‌ای و آزادی حرکت آن) و تقریباً نزدیک به هم است.

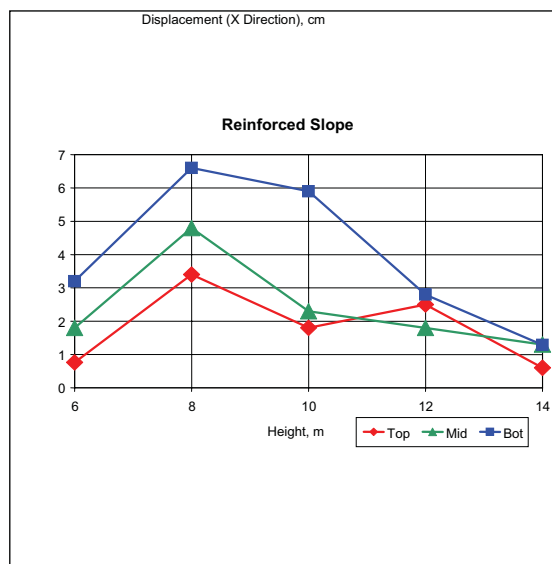
متر (جداول ۳ تا ۴) برگشت نمودارها و کاهش جابجایی‌های افقی در شیروانیهای بلندتر، مورد انتظار بوده که در نتایج حاصله و شکل ۱۱ نیز کاملاً دیده می‌شود و عملاً مهر تأییدی است بر اثر مسلح کننده‌ها در کنترل و کاهش تغییرشکل‌های افقی حین زلزله حتی در دیواره‌های مرتفع.

به این ترتیب نقش بارز و بسیار مؤثر و غیر قابل چشم پوشی ضرایب اطمینان طرح تسلیح در کنترل جابجایی‌های افقی کاملاً مشهود و قابل رؤیت است. همچنین طبق روال موجود در طرح تسلیح شیروانیها معمولاً نقاط بالایی یک شیروانی دچار تغییر شکلهای بزرگ‌تر شده و به منظور پیشگیری از بروز این معضل طول ژئوتکستایل و تسمه‌های مربوط در نواحی فوقانی شیروانی بیشتر می‌شود تا در عین حال از محدوده رانش محرک نیز خارج شده و بتواند خاک را مهار و پایدار کند (شکل ۳).

بنابراین، این افزایش طول تسمه‌ها در بخش‌های فوقانی شیروانی را به طور خودکار باعث می‌شود در بارگذاری‌های زلزله کنترل بهتری بر تغییر شکلهای افقی در ترازهای فوقانی شیروانی ایجاد شود که این موضوع نیز در شکل ۱۱ کاملاً دیده می‌شود به نحوی که به طور کلی منحنی نظیر δ_{XRmax} برای بخش تحتانی شیروانی و پاشنه آن (به دلیل کم و کوتاه بودن طول تسمه‌های مسلح کننده) مقادیر بیشتری برای جابجایی افقی نسبت به بخشهای فوقانی شیروانی نشان می‌دهد. به عبارت دیگر بر خلاف شیروانیهای غیر مسلح، در شیروانیهای مسلح شده با یک ارتفاع مشخص در بارگذاری‌های زلزله، پاشنه شیروانی به دلیل کمتر بودن طول تسمه‌های مسلح کننده، دچار تغییر شکلهای بیشتری نسبت به نقاط میانی و تاج شیروانی می‌شود.

۴-۴ بررسی تأثیر عملکرد طرح تسلیح بر کنترل جابجایی‌های افقی

با توجه به بررسیهای انجام شده در بندهای ۴-۱ تا ۴-۳ در نهایت در این بند مقایسه میان مقادیر δ_{Xmax} در دو حالت مسلح و غیرمسلح با توجه به شکلهای ۱۲، ۱۳ و ۱۴ انجام می‌شود. در این شکلهای مقادیر δ_{Xmax} در هر تراز شیروانی (پاشنه، میانه و تاج) در شیروانیها با ارتفاعهای مختلف ۶، ۸، ۱۰، ۱۲ و ۱۴ متر به صورت نمودار در حالتهای مسلح و غیرمسلح نشان داده شده‌اند.



شکل ۱۱. روند کلی تغییر مکانهای حداکثر افقی δ_{XRmax} در شیروانیهای مسلح

۴-۳-۲ بررسی تغییرات δ_{XRmax} نسبت به ارتفاع شیروانی مسلح

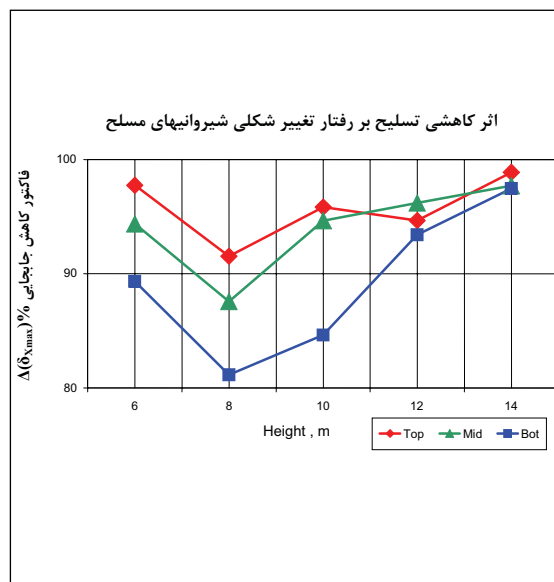
برای بررسی روند کلی مقادیر δ_{XRmax} در حالت مسلح در شیروانیها با ارتفاعهای مختلف، نموداری ارائه شده که در آن تابع اصلی δ_{XRmax} در محور قائم و ارتفاع شیروانی در محور افقی دیده می‌شود (شکل ۱۱). همان طور که در شکل دیده می‌شود به طور کلی روند تغییرات δ_{XRmax} نسبت به ارتفاع به گونه‌ای است که با افزایش ارتفاع شیروانی از ۶ متر به ۸ متر مقادیر δ_{XRmax} افزایش می‌یابد. طبق اطلاعات جدولهای ۳ و ۴ مشاهده می‌شود که ضرایب اطمینان طرح تسلیح برای این دو شیروانی تقریباً نزدیک به یکدیگر است، بنابراین عامل اصلی بروز تغییر شکلهای افقی، ارتفاع شیروانی خواهد بود که به دلیل بلندتر بودن شیروانی ۸ متری عملاً شرایط طره‌ای این شیروانی و آزادی حرکت آن بیشتر شده و مقادیر بیشتری از δ_{XRmax} دیده می‌شود. در عین حال از جداول ۵، ۶ و ۷ چنین بر می‌آید که طرح تسلیح به گونه‌ای بوده که ضرایب اطمینان مربوطه با افزایش ارتفاع شیروانی از ۸ متر الی ۱۴ متر قدری رشد داشته بنابراین این مهم منجر به کاهش δ_{XRmax} همراه با افزایش ارتفاع شیروانی می‌شود که در شکل ۱۱ کاملاً مشهود است.

در واقع به دلیل بالاتر بودن نسبی ضرایب اطمینان طرح تسلیح (در شرایط بارهای استاتیکی) برای شیروانیهای مرتفع‌تر ۱۰ تا ۱۴ متر (جداول ۵ تا ۷) در مقایسه با شیروانیهای کم ارتفاع ۶ تا ۸

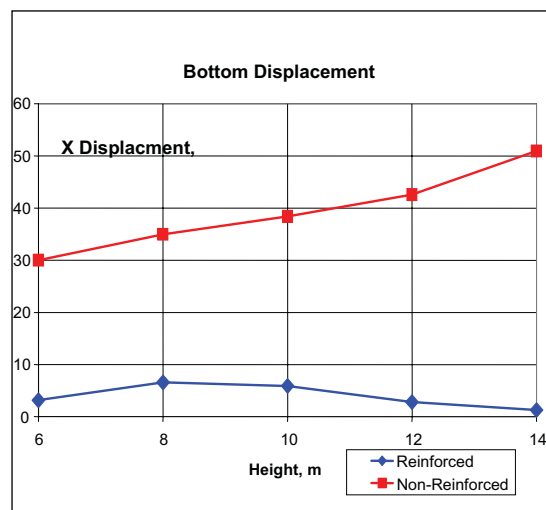
روند کلی موجود در این شکلها نشان می‌دهد که مسلح کردن شیروانی، مقادیر جابجایی‌ها را در پاشنه، میانه و تاج به نحو بارزی کنترل و محدود کرده و با افزایش ارتفاع شیروانی مانع افزایش تغییرشکل‌های افقی شده و δ_{Xmax} را تقریباً ثابت نگه می‌دارد، در حالی که در شیروانیهای غیرمسلح همراه با افزایش ارتفاع شیروانی، روند خطی افزایش δ_{Xmax} در سه تراز پاشنه، میانه و تاج کاملاً مشهود است.

۴-۵ بررسی کمیت بی بعد شاخص کاهش جابجایی افقی $(\Delta(\delta_{Xmax})\%)$

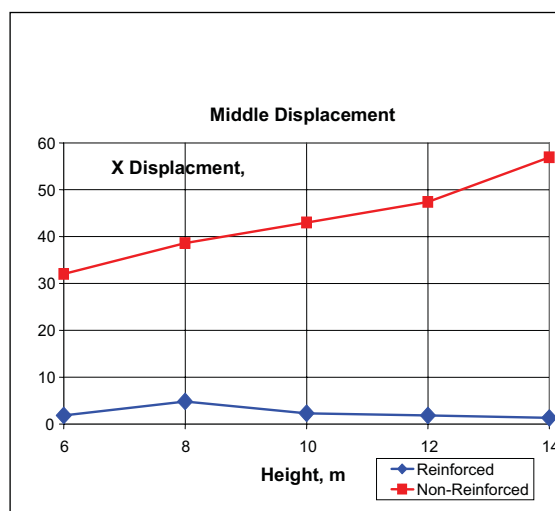
در شکل ۱۵ مقدار $\Delta(\delta_{Xmax})\%$ طبق رابطه (۲) برای شیروانیها با ارتفاعهای مختلف نشان داده شده است. طبق بررسی‌های انجام شده و در نگاه کلی در شرایط بهینه طرح تسلیح اثرات مثبت مسلح کردن شیروانی در ارتفاعهای بیشتر و شیروانیهای بلندتر به مراتب خود را بهتر نشان می‌دهد و در عین حال برای یک شیروانی با ارتفاع مشخص بیشترین کاهش در بالا و تاج شیروانی، و کمترین کاهش در پاشنه شیروانی دیده می‌شود. لازم به توضیح است که مقدار $\Delta(\delta_{Xmax})\%$ در شیروانی ۱۴ متری به مقادیر بالای ۹۵٪ هم می‌رسد که این یعنی کنترل قابل توجه و قطعی بروز جابجایی‌های افقی.



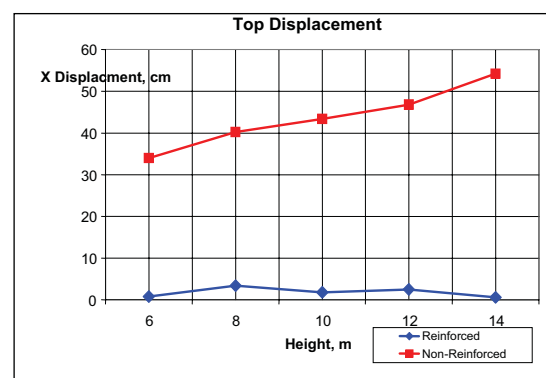
شکل ۱۵. تغییرات شاخص کاهش جابجایی افقی نسبت به ارتفاع در ترازهای مختلف شیروانی



شکل ۱۲. مقایسه تغییر مکانهای شیروانیهای مسلح و غیرمسلح در پاشنه شیروانی



شکل ۱۳. مقایسه تغییر مکانهای شیروانیهای مسلح و غیرمسلح در میانه شیروانی



شکل ۱۴. مقایسه تغییر مکانهای شیروانیهای مسلح و غیرمسلح در تاج شیروانی

۵. فرمولاسیون ریاضی شاخص کاهش جابجایی

$$\Delta(\delta_{Xmax})\% \text{ افقی}$$

طبق بررسی‌های انجام شده برای سه تراز مختلف پاشنه، میانه و تاج شیروانی فرمولهای ریاضی کمیت $\Delta(\delta_{Xmax})\%$ به صورت تابعی از ارتفاع شیروانی (H) به شرح زیر به دست آمد:

پاشنه :	$\Delta(\delta_{Xmax})\%_{Bot} = 2.13H^2 - 9.90H + 95.52$	(۳)
میانه :	$\Delta(\delta_{Xmax})\%_{Mid} = 0.79H^2 - 3.23H + 95.06$	(۴)
تاج :	$\Delta(\delta_{Xmax})\%_{Top} = 1.10H^2 - 6.07H + 101.84$	(۵)

و با توجه به این که مدل‌های انتخابی چه از نظر جنس مصالح، هندسه و چه از نظر ژئوتکتستایلهای به کار رفته کاملاً تپ و متداول بوده‌اند، می‌توان روابط (۳) تا (۵) را برای پروژه‌های متداول پایدار سازی شیروانیها معتبر دانست.

۶. جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

با توجه به بررسی‌های جامعی که انجام شده نتایج زیر ارائه می‌شوند:

- در تبیین رفتار لرزه ای شیروانیهای قائم رسی چه مسلح و چه غیر مسلح، بیشینه جابجایی افقی معمولاً در زمان حداکثر شتابهای وارده حادث می‌شود.
- استفاده از ژئوتکتستایلهای شرایط مناسب تر و متعادل‌تری از نظر توزیع تغییر شکل‌های افقی در خاک ایجاد کرده و از افزایش بیش از حد جابجایی‌ها پیشگیری می‌کند.
- در شیروانیهای غیرمسلح، حین بارگذاری لرزه‌ای، معمولاً مقدار بیشینه جابجایی افقی در تاج و مقدار کمینه در پاشنه و در میانه بینابین است.
- در شیروانیهای مسلح حین بارگذاری لرزه‌ای معمولاً مقدار بیشینه جابجایی افقی در پاشنه و مقدار کمینه در تاج و در میانه بینابین است.
- با افزایش ارتفاع شیروانی مقدار شاخص کاهش تغییر شکل‌های افقی افزایش یافته و سیستم تسلیح خاک بطور مؤثرتر کاهش نسبی بیشتری در جابجایی افقی ایجاد می‌کند

و به عبارت دیگر با افزایش ارتفاع شیروانی عملکرد مثبت آنها مشهودتر و بارزتر است.

۶- با افزایش تراز یک شیروانی با ارتفاع مشخص از پاشنه تا تاج شیروانی، مقدار شاخص کاهش تغییر شکل‌های افقی افزایش یافته و سیستم تسلیح خاک به گونه‌ای مؤثرتر کاهش نسبی بیشتری در جابجایی افقی پدید می‌آورد و به عبارت دیگر در ترازهای بالاتر یک شیروانی عملکرد مثبت آنها مشهودتر و بارزتر است.

۷- طرحهای تسلیح متداول در شرایط بهینه و طراحی فنی مناسب قادرند حداقل تا ۸۰٪ تغییر مکانهای افقی شیروانی حین زلزله را کاهش دهند.

۷. سپاسگزاری

از زحمات آقای مهندس شهاب زمردی مقدم و دانشگاه آزاد اسلامی واحد اراک سپاسگزاری می‌شود.

۸. مراجع

- Vidal, H. (1966) "La Terre armee", Anales de l'Institut Technique du Batiment et des Travaux Publiques, France, July-August, pp. 888-938.
- Bell, J. R., Stilley, A. N. and Vandre, B. (1975) "Fabric retaining earth walls", Proceedings of the 13th Engineering Geology and Soils Engineering Symposium, Moscow, Idaho.
- Lee, K. L., Adams, B. D. and Vagneron, J. J. (1973) "Reinforced earth retaining walls" Journal of the Soil Mechanics and Foundations, ASCE, Vol. 99, No. SM10, pp. 745-763.
- Koerner, R. B. (1986) "Design with Geosynthetics", Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N. J.
- Allen T. M., Bathurst R. J., (2001) "Prediction of Soil Reinforcement Loads in Mechanically Stabilized Earth (MSE) Walls", Washington State Department of Transportation, WA-RD 522.1

15. Okabe, S. (1924) "General theory on earth pressure and seismic stability of retaining wall and dam", *Doboku Gakkaishi - Journal of the Japan Society of Civil Engineers*, Vol. 10, No. 6, pp. 1277-1323.
16. Earthquake of San Jose 1955-09-05 02:01:18 UTC "Consortium of organizations for strong-motion observation systems" (COSMOS), The Regents of the University of California.
17. ANSYS Help System, Theory Reference, Ver 8.0
18. Barkan, D. D. (1962) "Dynamics of bases and foundations", McGraw-Hill, New York
19. Das, B.M. (1993) "Fundamentals of soil dynamics" PSW-Kent.
20. Cai, Z., Bathurst, R. J. (1995) "Seismic response analysis of geosynthetic reinforced soil segmental retaining walls by finite element method", *Computers and Geotechnics*, Vol. 17 No. 4, pp. 523-546.
6. Bathurst, R. J., Hatami, K. (1998) "Seismic response analysis of a reinforced soil retaining wall", *Geosynthetics International (special issue on Earthquake Engineering)*, Industrial Fabrics Association International (IFAI), USA, 5(1-2), p. 127-166.
7. Bathurst, R. J., Cai, Z. (1995) "Pseudo-static seismic analysis of geosynthetic reinforced segmental retaining walls", *Geosynthetics International*, Vol. 2, No. 5, pp. 789-832.
8. National Concrete Masonry Association (NCMA) (1998) "Segmental retaining walls - seismic design manual (Supplement to Design Manual for Segmental Retaining Walls authored by RJ Bathurst)", Herdon, VA, USA, p. 118
9. AASHTO (1998) Interims: "Standard specifications for highway bridges", American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC, USA.
10. FHWA (1996) "Mechanically stabilized earth walls and reinforced soil slopes design and construction guidelines" In V. Elias and B.R. Christopher (eds). Federal Highway Administration (FHWA) Demonstration Project 82, Washington, DC, USA.

۲۱. بهرامی سربندی، بابک (۱۳۸۳) "بررسی رفتار شیروانیهای قائم رسی در دو حالت مسلح و غیرمسلح در برابر بارهای دینامیکی وارده ناشی از زلزله"، پایان نامه کارشناسی ارشد، استاد راهنما: مهتاب جسمانی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اراک.

پانویس‌ها

1. Reinforced Steep Slope (RSS)
2. Mechanically Stabilized Earth Wall (MSEW)
3. Fast Lagrangian Analysis of Continua, (FLAC)
4. National Concrete Masonry Association (NCMA)
5. AASHTO Standard Specifications for Highway Bridges
6. Federal Highway Administration, (FHWA)
7. Peak Ground Acceleration
8. Pseudo Static Method
9. Mononobe – Okabe Method
10. Plane Strain
11. Spring-Damper
12. Transient
11. Hatami, K., Bathurst, R. J. (2001) "Investigation of seismic response of reinforced-soil retaining walls", *Proceedings of the 4th International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics*, Paper No. 7.18 (8p on CD).
12. Holtz R. D. and Lee W. F. (2002) "Internal stability analyses of geosynthetic reinforced retaining walls", Washington State Department of Transportation, WA-RD 532.1
13. Elias, V., Christophere, B. R. and Berg, R. R. (2001) "Mechanically stabilized earth walls and reinforced soil slopes design and construction guidelines", FHWA-NHI-00-043, U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration.
14. Day, R. D. (2002) "Geotechnical Earthquake Engineering Handbook", McGraw-Hill.

Finite Element Modeling of the Behavior of Reinforced Vertical Cohesive Slopes under Earthquake Loading in Transportation

M. Jesmani, Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Imam Khomeini University, Qazvin, Iran

M. Mir Hoseini, Associate Professor, Department of Civil Engineering, Amir Kabi University of Technology, Tehran, Iran

*B. Bahrami Sarbandi, MSc., Department of Civil Engineering, Azad Islamic University-Arak Branch, Arak, Iran
E-mail: mehrabjesmani@yahoo.com*

ABSTRACT

This paper describes a FE simulation of the behavior of mechanically stabilized cohesive earth walls under seismic loads and the effects of reinforcements in reduction of deformations under earthquake loads were studied. In this manner, different heights and different systems of reinforcement were considered.

First of all, the maximum height of cohesive vertical slope was estimated without any reinforcement. In other words, five different types of cohesive soils were considered and their maximum stable heights were calculated. Then a geotextile reinforcement system was designed for each wall with the recommended method in the research. Also, to be reassured about the better design of the reinforced walls under seismic loads (considering that the used method for design was merely regarded static loads) the walls were modeled and their stress-strain behaviors were obtained under Saint Jose earthquake loading. After some try and error steps, and finding the safety factors in each step, the optimized design was gained. After that, to evaluate the effects of reinforcements in reduction of deformation in retaining systems some comparisons were made between the reinforced and non-reinforced walls with different heights (6m, 8m, 10m, 12m and 14m) The results of stress-strain analysis were tabulated and related curves were presented . The results clearly show that the reinforcement systems force a full control on displacement specially at the top and the middle of the walls which are the critical zones in retaining walls behavior under seismic loads. Finally it was shown using reinforced system in vertical cohesive slopes with common height, under seismic loads, can reduce the X components of deformations more than 90%.

Keywords: Reinforced slopes, mechanically stabilized wall (MSW), seismic loads on reinforced slopes