

بهینه‌سازی حایل‌های پایدارشده با میخ با بهره‌گیری از الگوریتم ژنتیک

علی کمک‌پناه* (دانشیار)

احسان آهوزش (کارشناس ارشد)

دانشکده‌ی مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس

مهندسی عمران شریف، (تابستان ۱۳۹۵)
دوره‌ی ۲ - ۳۲، شماره‌ی ۲/۲، ص. ۱۲۵-۱۳۷، (پادداشت فنی)

میخ‌کوبی خاک^۱ یک روش پایدارسازی شیب‌ها و گودبرداری‌هاست، که به دلیل انعطاف‌پذیری، سرعت، و سهولت اجرا و نیز اقتصادی‌تر بودن نسبت به دیگر سیستم‌های پایدارسازی، طی دهه‌های اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته است. یکی از مزیت‌های دیوارهای پایدارشده با میخ، امکان صرفه‌جویی اقتصادی است. بنابراین طراحی بهینه‌ی چنین سیستم‌هایی باید با دقت خاصی انجام پذیرد. در این پژوهش ضمن تأمین پایدارسازی حایل‌های پایدارشده با میخ، کاهش هزینه‌ی ساخت به‌عنوان یک مسئله‌ی بهینه‌سازی مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور برنامه‌ی به زبان Matlab تهیه شده است، که در آن برای عملیات بهینه‌سازی از الگوریتم ژنتیک استفاده شده است. با استفاده از این برنامه، اثر برخی پارامترهای مهم قیمتی، از جمله هزینه‌ی حفاری چاله‌ها، فولاد و بتن پاشیده (شاتکریت)، در طراحی بهینه مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است.

واژگان کلیدی: بهینه‌سازی، میخ‌کوبی خاک، الگوریتم ژنتیک، پایدارسازی حایل، پایدارسازی داخلی.

۱. مقدمه

مفهوم اصلی میخ‌کوبی خاک، تسلیح و مقاوم‌سازی خاک با نصب میلگردهای فولادی نزدیک به هم که میخ^۲ نامیده می‌شوند، در دیواره‌ی یک شیب یا گود، در فرایند ساخت از بالا به پایین و یک‌پارچه کردن آنها با خاک محل به واسطه‌ی تزریق دوغاب سیمان است.^[۱] اساس این شیوه، بسیج مقاومت کششی تقویت فولادی در اثر تغییر شکل‌های نسبتاً کوچک در خاک پیرامونی است.^[۲] در این روش، ناحیه‌ی تقویت‌شده‌ی در خاک ایجاد می‌شود، که مانند یک دیوار حایل وزنی عمل می‌کند و می‌تواند توده‌ی خاک پشت سر خود را نگهداری کند.^[۳]

هنگامی که تصمیم به پایدارسازی یک شیب یا گود با میخ‌کوبی خاک گرفته می‌شود، لازم است برای طراحی سیستم، ضمن رعایت الزامات فنی، تحلیل هزینه‌ی نیز انجام شود. معمولاً تعیین ابعاد و موقعیت میخ‌ها و مشخصات رخیوش با ملاحظات توأم فنی و اقتصادی، طراحان را با دشواری‌هایی مواجه می‌کند. در واقع بهینه‌سازی مسئله با توجه به تعدد و تنوع پارامترهای طراحی بسیار حائز اهمیت است و این، موضوع پژوهش حاضر است. در این پژوهش با تدوین برنامه‌ی رایانه‌ی با بهره‌گیری از الگوریتم ژنتیک، امکان بهینه‌سازی طراحی دسته‌ی وسیعی از دیوارهای پایدارشده با میخ فراهم شده است؛ که پس از تهیه‌ی برنامه‌ی مورد نظر، ابتدا برای صحت‌سنجی، طراحی میخ‌کوبی چندین نمونه دیواره‌ی گود با مشخصات

* نویسنده مسئول

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۱/۲۵، اصلاحیه ۱۳۹۳/۸/۱۰، پذیرش: ۱۳۹۳/۸/۲۴.

a_pannah@modares.ac.ir
eh_amoozesh@yahoo.com

۲. مطالعات پیشین

طبق مطالعات نگارندگان، تاکنون مطالعات چندانی در خصوص طراحی بهینه‌ی میخ‌کوبی خاک انجام نشده است. مطالعات قابل ذکر در این زمینه به این شرح است: در پژوهشی در سال ۱۹۹۵، یک روش طراحی برای شیب‌های پایدارشده با میخ، پیرو روش اصلاح‌شده‌ی تعادل حدی جانبو (۱۹۷۳) ارائه شده است، که در آن کمیته‌ی نیروی تقویتی لازم برای رسیدن به یک ضریب اطمینان مطلوب با در نظر گرفتن جهت میخ‌ها و توزیع نیروهای تقویتی به‌عنوان متغیرهای طراحی و موقعیت بهینه‌ی میخ‌ها با تغییر دادن محل آنها به‌دست آمده است. در مطالعه‌ی یادشده، توجه کاملی به جنبه‌های مختلف مانند: موقعیت، طول، قطر، و جهت بهینه‌ی میخ‌ها نشده است.^[۴] در پژوهش دیگری نیز در سال ۲۰۰۵، روشی برای طراحی بهینه‌ی میخ‌کوبی خاک با توجه به موقعیت، اندازه (طول و قطر) و شیب میخ‌ها ارائه شده است، که در آن فقط هزینه‌ی فولاد مصرفی برای میخ‌ها در نظر گرفته شده و بهینه‌سازی با

چنانچه مطابق شکل ۴، میخی تحت اثر نیروی کششی T در یک انتهای خود قرار داشته باشد، با اعمال تعادل نیروها در قطعه‌یی با جزء طول dx ، رابطه‌ی ۵ را خواهیم داشت:

$$dT = \pi D_{DH} q dx = Q dx \quad (5)$$

بنابر رابطه‌ی ۵، نیروی کششی در فاصله‌ی x ، با استفاده از رابطه‌ی ۶ محاسبه می‌شود:

$$T(x) = \int_0^x \pi D_{DH} q dx = \int_0^x Q dx \quad (6)$$

چنان که در شکل ۴ نشان داده شده است، توزیع واقعی تنش پیوستگی، یکنواخت نیست و به عواملی مانند: طول میخ، مقدار نیروی کششی اعمالی، مشخصات دوغاب، و شرایط خاک بستگی دارد. اما اغلب فرض می‌شود توزیع تنش در طول میخ یکنواخت باشد، که نتیجه‌ی آن نرخ ثابت انتقال بار (Q) است. با این فرض، نیروی میخ در انتهای طول از جا درآمدگی (L_p)، از رابطه‌ی ۷ به دست می‌آید:

$$T(L_p) = T_0 = Q L_p \quad (7)$$

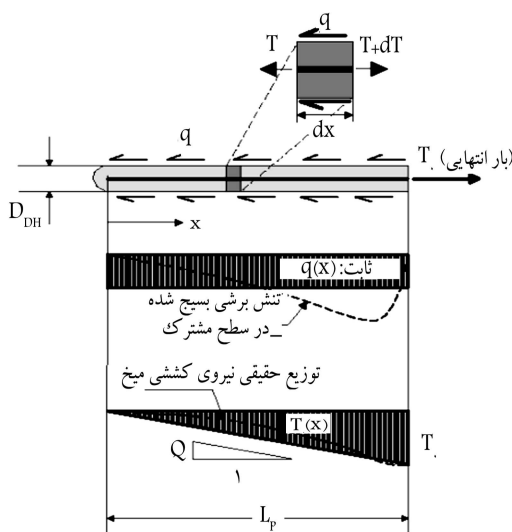
هنگامی که مقاومت پیوستگی نهایی حاصل شده باشد، ظرفیت از جا درآمدگی (R_p) بسیج شده است (رابطه‌ی ۸):

$$R_p = T_{max} = Q_u L_p \quad (8)$$

که در آن، L_p طولی از میخ است که در پشت سطح گسیختگی قرار دارد و Q_u مقاومت پیوستگی نهایی بوده و Q_u نیز ظرفیت از جا درآمدگی به ازاء واحد طول یا نرخ نهایی انتقال بار است که از رابطه‌ی ۹ به دست می‌آید:

$$Q_u = \pi q_u D_{DH} \quad (9)$$

مقاومت پیوستگی به عواملی مانند نوع خاک و روش نصب میخ بستگی دارد. در منابع مختلف، روابط و یا مقادیری (براساس عوامل یادشده) برای q_u یا Q_u ذکر شده است. به‌عنوان مثال در جدول ۳.۱^[۸] از مرجع^[۸]، براساس عوامل یادشده مقادیری برای مقاومت پیوستگی پیشنهاد شده است و با در مرجع^[۱۳]، نمودارهایی



شکل ۴. انتقال تنش در میخ تحت نیروی T_0 در یک انتهای آن.^[۹]

باید توجه داشت که در روش گوه آزمایشی، نیروهای محرک و مقاوم به ازاء واحد طول دیوار محاسبه می‌شوند. مطالعات مختلف، از جمله کار تحلیلی انجام‌شده‌یی در سال ۱۹۹۲^[۸]، ناچیز بودن مقاومت برشی افزوده ناشی از خمش میخ‌ها را نشان داده است. به‌علاوه، این مکانیسم تقویت، نیاز به تغییر شکل‌هایی در خاک دارد که با آنچه برای بسیج کردن کشش میخ لازم است، ناسازگار است. بنابراین با فرضی واقع‌گرایانه، در روش تحلیل یادشده از آن صرف‌نظر شده است.

با تغییر زاویه‌ی θ و تکرار فرایند یادشده، سطوح لغزش مختلف بررسی می‌شود و پس از تعیین سطح لغزش بحرانی، با مقایسه‌ی ضریب اطمینان مربوط و مقدار کمینه‌ی در نظر گرفته‌شده، در صورت لزوم باید طول میخ‌ها، آرایش آنها و یا قطر چاله تغییر داده شود و فرایند کنترل پایداری دوباره انجام شود.

محدوده‌ی کاربرد روش تحلیلی ذکرشده، کلیه‌ی شرایطی است که مناسب پایداری به کمک میخ‌کوبی خاک هستند، جز آنکه بارهای دینامیکی و وجود سفره‌ی آب زیرزمینی در نظر گرفته نشده است، که البته در شرایط وجود آب زیرزمینی اصولاً استفاده از این روش پایداری توصیه نمی‌شود.^[۹]

۲.۳. بررسی پایداری داخلی

حالت‌های گسیختگی داخلی مربوط به بروز اشکال در مکانیسم‌های انتقال بار بین خاک، میخ و دوغاب می‌شود. هنگامی که سیستم دیوار پایداری با میخ در طی گودبرداری تغییر شکل می‌دهد، مقاومت پیوستگی میان دوغاب و خاک اطراف میخ‌ها بسیج می‌شود. با بسیج مقاومت پیوستگی، نیروهای کششی در میخ ایجاد می‌شود. برای ارزیابی حالت‌های گسیختگی داخلی، باید بیشینه‌ی نیروی کششی ایجادشده

در میخ‌ها با ظرفیت‌های مربوط مقایسه شود. اندرکنش خاک - میخ پیچیده است و مطالعات تئوری و تجربی بسیاری توسط پژوهشگران مختلف،^[۱۰-۱۲] در این زمینه انجام شده است. نیروهای کششی بیشینه، عموماً در نزدیکی سطح گسیختگی بحرانی یافت شده در فرایند تحلیل پایداری کلی ایجاد می‌شوند و فرض انطباق محل نیروهای بیشینه بر این سطح منطقی است. براساس نتایج بررسی نیروهای کششی محاسبه‌شده در دیوارهای واقعی توسط Byrne و همکارانش (۱۹۹۸)، در دو سوم بالایی دیوار مقدار $0.75 K_a \gamma H S_V S_H$ ، (که در آن، K_a ضریب فشار محرک خاک، γ وزن مخصوص طبیعی خاک، H ارتفاع دیوار، S_V و S_H به ترتیب فاصله‌ی قائم و افقی میخ‌ها هستند)، و در بخش پایینی، نصف این مقدار را برای نیروی کششی بیشینه می‌توان در نظر گرفت (برای شرایط خدمت^[۹]). در ادامه، مهم‌ترین حالت‌های گسیختگی داخلی بررسی شده‌اند.

۱.۲.۳. مقاومت از جا درآمدگی میخ

مهم‌ترین حالت گسیختگی داخلی، از جا درآمدگی میخ است. این مد گسیختگی معمولاً در طول سطح مشترک خاک - دوغاب رخ می‌دهد و هنگامی اتفاق می‌افتد که مقاومت پیوستگی و یا طول میخ کافی نباشد.

ضمناً باید به مقاومت پیوستگی بین دوغاب و میخ نیز توجه شود. چنانچه از میلگردهای آج‌دار برای میخ‌ها استفاده شود، در مقایسه با میلگردهای ساده، این پیوستگی مکانیکی افزایش خواهد یافت.

در حالت کلی نیروی بسیج‌شده در مقابل از جا درآمدگی را به ازاء واحد طول، می‌توان به صورت رابطه‌ی ۴ بیان کرد:

$$Q = \pi q D_{DH} \quad (4)$$

که در آن، q تنش برشی بسیج‌شده در سطح مشترک خاک و میخ، و D_{DH} قطر میانگین و یا مؤثر چاله‌ی میخ است.

برای تخمین این پارامتر براساس نتایج آزمایش نفوذ مخروط (CPT) ارائه شده است. همچنین می‌توان از نتایج آزمایش از جا درآمدگی میخ‌ها برای این منظور استفاده کرد و به اعداد قابل اعتمادتری رسید.

به دلیل عدم قطعیت‌های موجود در خصوص مقاومت پیوستگی و اندرکنش خاک و دوغاب، با در نظر گرفتن ضریب اطمینانی (FS_p) ، مقادیر مجاز مقاومت پیوستگی و ظرفیت از جا درآمدگی به ازاء واحد طول، با استفاده از روابط ۱۰ و ۱۱ محاسبه می‌شوند:

$$q_{ALL} = \frac{q_u}{FS_p} \quad (10)$$

$$R_{pALL} = \frac{R_p}{FS_p} \quad (11)$$

در فرایند کنترل پایداری کلی دیوار، طول قابل قبول میخ‌ها و نقش تقویتی آنها با توجه به ضریب اطمینان در مقابل از جا درآمدگی در نظر گرفته می‌شود.^[۹]

۲.۲.۳. مقاومت کششی میخ

بارهای اعمالی به میخ‌ها در اثر حرکت به سمت بیرون دیوار در هنگام گودبرداری ایجاد می‌شوند. بخشی از میخ که در پشت سطح گسیختگی (ناحیه‌ی مهار) قرار دارد، به سمت خارج شیب کشیده می‌شود. نیروی کششی (T) در طول میخ بدین صورت تغییر می‌کند که با مقدار صفر در انتهای میخ آغاز می‌شود، تا مقدار T_{max} در میانه‌ی طول افزایش و به مقدار T در رخیوش کاهش می‌یابد.

گسیختگی کششی میخ هنگامی اتفاق می‌افتد که بیشینه‌ی نیروی محوری ایجاد شده در میخ بیشتر از ظرفیت کششی آن (R_T) باشد. ظرفیت کششی میخ با استفاده از رابطه‌ی ۱۲ مشخص می‌شود:

$$R_T = A_t f_y \quad (12)$$

که در آن، A_t سطح مقطع میلگرد و f_y تنش تسلیم آن است.

به علت اختلاف سختی (مدول کشسانی) دوغاب و میخ، از ظرفیت کششی دوغاب صرف نظر می‌شود. به دلیل عدم قطعیت‌های مربوط به مقاومت مصالح و بارهای اعمالی، با اعمال ضریب اطمینان (FS_T) ، ظرفیت کششی میخ به صورت رابطه‌ی ۱۳ محاسبه می‌شود:

$$R_{TALL} = \frac{R_T}{FS_T} \quad (13)$$

همان‌گونه که پیشتر نیز یاد شده است، کمینه‌ی قطر لازم برای میلگردها با توجه به ضریب اطمینان در مقابل کشش تعیین می‌شود.^[۹]

۴. حالت‌های گسیختگی مربوط به رخیوش^۳ (طراحی رخیوش)

معمول‌ترین حالت‌های گسیختگی بالقوه در رخیوش و در محل اتصال میخ‌ها به آن عبارت‌اند از:

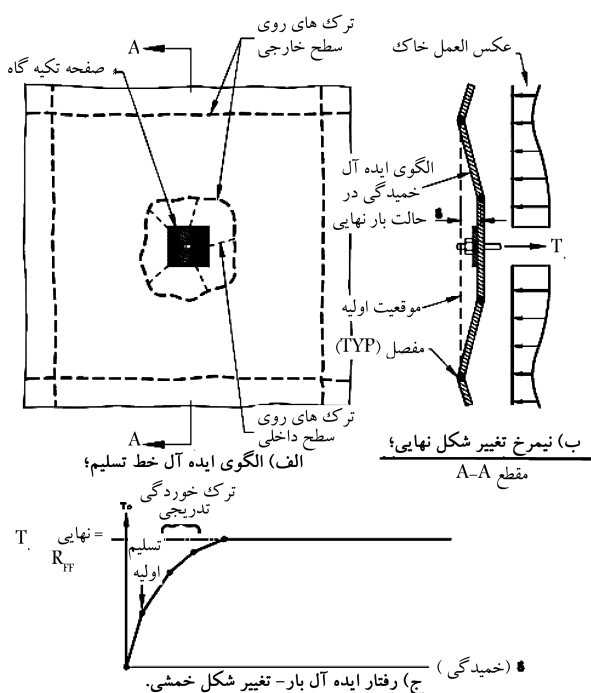
۱. گسیختگی خمشی.

۲. گسیختگی در اثر برش سوراخ‌کننده.^۴

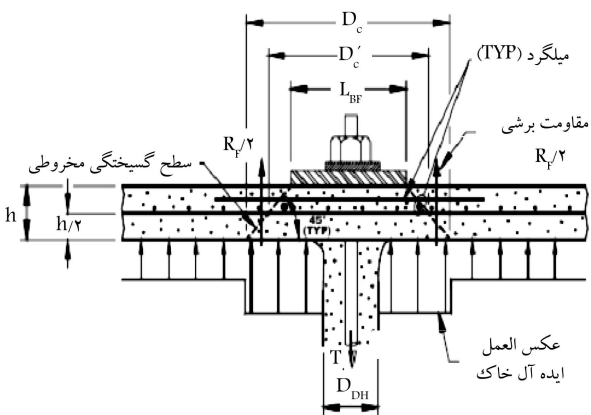
رخیوش دیوارهای پایدار شده با میخ را، که معمولاً شاکریت مسلح است، می‌توان به عنوان یک دال بتنی مسلح در نظر گرفت، که بارگذاری آن فشار جانبی خاک و

نیروهای تکیه‌گاهی آن، کشش میخ‌هاست. این سیستم بارو عکس‌العمل، باعث ایجاد لنگرهای خمشی مثبت در فواصل بین میخ‌ها و لنگرهای منفی در نواحی اطراف میخ‌ها می‌شود. گسیختگی خمشی، مربوط به افزایش خمش نسبت به ظرفیت خمشی رخیوش است و با ایجاد ترک‌هایی مشخص می‌شود. پس از تسلیم اولیه‌ی رخیوش و با افزایش فشار جانبی خاک، گسترش ترک‌ها در هر دو سوی رخیوش اتفاق می‌افتد. سرانجام در شرایطی که ظرفیت نهایی حاصل شده باشد، تمام این ترک‌ها به هم می‌پیوندند، مانند مفصل‌هایی عمل می‌کنند، و مکانیسمی را شکل می‌دهند که الگوی خط تسلیم بحرانی^۵ نامیده می‌شود (شکل ۵).

در این فرایند، نیروی کششی میخ‌ها و تغییر شکل‌ها نیز افزایش می‌یابند. گسیختگی موضعی رخیوش در اثر برش سوراخ‌کننده نیز هنگامی که نیروی میخ‌ها به یک مقدار بحرانی برسند، در اطراف میخ‌ها و در سطحی مخروطی شکل اتفاق می‌افتد. وجه‌های این مخروط ناقص، مطابق شکل ۶، با شیبی حدود ۴۵ درجه از پشت صفحه‌ی تکیه‌گاه میخ، در ضخامت رخیوش ایجاد می‌شوند. تحلیل در این شرایط نیز همانند



شکل ۵. گسیختگی خمشی تدریجی در رخیوش.^[۹]



شکل ۶. گسیختگی رخیوش در اثر برش سوراخ‌کننده.^[۹]

هـ) با توجه به مقدار کمتر $(a_n + a_m)$ در راستای افق و یا قائم، مقاومت خمشی رخیوش از رابطه‌ی ۲۰ تعیین می‌شود:

$$R_{FF} [\text{kN}] = 1,6 \times C_F \times (a_n + a_m) [\text{mm}^2/\text{m}] \times h [\text{m}] \quad (20)$$

که در آن، C_F ضریبی برای منظورکردن توزیع غیریکنواخت فشار خاک پشت رخیوش است و برای رخیوش موقت با ضخامت‌های ۱۰۰ و ۱۵۰ میلی‌متر، به ترتیب برابر با ۲ و ۱٫۵ تعریف می‌شود. این ضریب برای رخیوش موقت با ضخامت ۲۰۰ میلی‌متر و بیشتر و نیز تمام رخیوش‌های دائمی، برابر با ۱ است.

و) با در نظر گرفتن ضریب اطمینان لازم (FS_{FF}) ، مقاومت رخیوش در مقابل خمش با رابطه‌ی ۲۱ کنترل می‌شود:

$$R_{FF} \geq FS_{FF} T \quad (21)$$

در صورت عدم تأمین شرط ذکر شده (رابطه‌ی ۲۱)، باید پس از افزایش مقدار یک یا چند مورد از عوامل طراحی، شامل مقاومت تسلیم فولاد و یا بتن، ضخامت شاکریت و مقدار مصالح تسلیح، محاسبات را تکرار کرد.

۵. مقاومت رخیوش در برابر برش سوراخ‌کننده در این فرایند کنترل می‌شود:

الف) ظرفیت رخیوش برای برش سوراخ‌کننده (R_{FP}) به صورت رابطه‌ی ۲۲ تعیین می‌شود:

$$R_{FP} = C_P V_F \quad (22)$$

که در آن، C_P ضریب تصحیح برای منظورکردن مشارکت خاک است. چنانچه اثر خاک در نظر گرفته شود، مقدار این ضریب می‌تواند تا ۱٫۱۵ فرض باشد، اما معمولاً از این اثر صرف‌نظر و ضریب تصحیح برابر با ۱ فرض می‌شود. V_F نیز برش سوراخ‌کننده‌ی است که در رخیوش تحمل و با رابطه‌ی ۲۳ تخمین زده می‌شود:

$$V_F [\text{kN}] = 330 \sqrt{f'_c [\text{MPa}]} \times \pi \times D'_c [\text{m}] \times h_c [\text{m}] \quad (23)$$

که در آن، h_c ارتفاع مخروط ناقص گسیختگی (برابر با ضخامت شاکریت) و D'_c قطر مؤثر آن در مرکز مقطع است. با توجه به طول انتخاب شده برای صفحه‌ی تکیه‌گاه (LBP) و ضخامت شاکریت (h) ، D'_c از رابطه‌ی ۲۴ به دست می‌آید:

$$D'_c = LBP + h \quad (24)$$

ب) با در نظر گرفتن ضریب اطمینان لازم (FS_{FP}) ، مقاومت رخیوش در برابر برش سوراخ‌کننده با رابطه‌ی ۲۵ کنترل می‌شود:

$$R_{FP} \geq FS_{FP} T \quad (25)$$

در صورتی که رابطه‌ی ۲۵ صدق نکند، فرایند یاد شده با انتخاب ابعاد بزرگ‌تر و یا مصالح مقاوم‌تر تکرار می‌شود.

یک تاوه‌ی بتنی تحت بارهای متمرکز انجام می‌شود.^[۹]

در این مرحله، برای در نظر گرفتن ضریب اطمینان در مقابل وقوع این گسیختگی‌ها، فرایند طراحی رخیوش بتن پاشیده (شاکریت)، به این صورت طی می‌شود:^[۹]

۱. نیروی کششی میخ در محل اتصال به رخیوش تعیین می‌شود. براساس راهنمای طراحی کلوتر (۱۹۹۱)، که با توجه به نتایج حاصل از دیوارهای آزمایشی ارائه شده است، با استفاده از رابطه‌ی ۱۴، می‌توان نیروی سر میخ را محاسبه کرد:

$$T_0 = T_{\max} [0,6 + 0,2(S_{\max} - 1)] \quad (14)$$

که در آن، T_0 نیرو در سر میخ، T_{\max} نیروی کششی بیشینه‌ی آن، و S_{\max} بیشینه‌ی فاصله‌گذاری میخ‌ها به متر است. همچنین براساس بررسی نتایج مطالعات تجربی توسط Byrne و همکارانش (۱۹۹۸)، می‌توان مقدار نیروی T_0 را بین $0,6 K_a \gamma H S_V S_H$ تا $0,7 K_a \gamma H S_V S_H$ در نظر گرفت.

۲. ضخامتی برای رخیوش انتخاب می‌شود (مثلاً: ۱۰۰، ۱۵۰ یا ۲۰۰ میلی‌متر).

۳. سایر مشخصات مربوط به رخیوش، شامل: ابعاد چشمه و قطر شبکه‌ی فلزی جوش شده، قطر میلگردهای افزوده‌ی افقی و قائم در محل سر میخ‌ها، ابعاد صفحه‌ی تکیه‌گاه، و مقاومت تسلیم فولاد و بتن (به ترتیب: f'_c و f_y) انتخاب می‌شود.

۴. مقاومت خمشی رخیوش با این گام‌ها کنترل می‌شود:

الف) کمینه و بیشینه‌ی نسبت تسلیح، به ترتیب با استفاده از روابط ۱۵ و ۱۶ تعیین می‌شوند:

$$\rho_{\min} [\%] = 20 \frac{\sqrt{f'_c [\text{MPa}]}}{f_y [\text{M}]} \quad (15)$$

$$\rho_{\max} [\%] = 0,75 \frac{f'_c [\text{MPa}]}{f_y [\text{M}]} \left(\frac{600}{600 + f_y [\text{MPa}]} \right) \quad (16)$$

ب) سطح مقطع اعضاء تسلیح رخیوش به ازاء واحد طول در هر دو راستای افقی و قائم تعیین می‌شود. در صورت استفاده از میلگردهای افزوده، این پارامتر در محل سر میخ (a_n) و در فواصل بین میخ‌ها (a_m) ، به طور جداگانه محاسبه می‌شود. مقدار a_m با توجه به شبکه‌ی فلزی انتخاب شده، مشخص می‌شود و a_n در راستای قائم از رابطه‌ی ۱۷ به دست می‌آید:

$$a_n = a_m + \frac{A_{vw}}{S_H} \quad (17)$$

که در آن، A_{vw} سطح مقطع میلگردهای افزوده در محل سر میخ در راستای قائم است. برای محاسبه‌ی a_n در راستای افقی نیز می‌توان با اعمال تغییرات لازم از رابطه‌ی ۱۷ استفاده کرد.

ج) نسبت تسلیح در محل میخ‌ها (ρ_n) و فواصل بین آنها (ρ_m) ، با استفاده از روابط ۱۸ و ۱۹ محاسبه می‌شود:

$$\rho_n [\%] = \frac{a_n}{bh} 100 \quad (18)$$

$$\rho_m [\%] = \frac{a_m}{bh} 100 \quad (19)$$

که در آن‌ها، h ضخامت شاکریت و b واحد طول (۱ متر) است.

د) در این مرحله کنترل می‌شود که نسبت تسلیح در محل میخ‌ها و فواصل بین آنها، در محدوده‌ی مجاز قرار داشته باشد $(\rho_{\min} \leq \rho_m, \rho_n \leq \rho_{\max})$. در غیر این صورت، با تغییر a_m و یا a_n ، شرایط مذکور تأمین می‌شود.

۵. الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک روشی آماری برای بهینه‌سازی از طریق جست‌وجو است. ویژگی‌های خاص این الگوریتم باعث می‌شود که نتوان آن را یک جست‌وجوگر تصادفی قلمداد کرد. در واقع نظر اولیه‌ی این روش از نظریه‌ی تکاملی داروین الهام می‌گیرد و عملکرد آن بر ژنتیک طبیعی استوار است. اصول اولیه‌ی الگوریتم ژنتیک توسط هولاند^۶ و همکارانش در دانشگاه میشیگان در سال ۱۹۶۲ ارائه شده است. همچنین گلدبرگ^۷ در سال ۱۹۸۹ تئوری اساسی الگوریتم ژنتیک را ارائه کرده و آن را که تا آن زمان در مورد سیستم‌های طبیعت به کار می‌رفته است، به مسائل مهندسی تعمیم داده است. در سال ۱۹۹۰ این^۸ و همکاران، هم‌گرایی الگوریتم ژنتیک را با استفاده از روش آنالیز زنجیره‌ی مارکوف اثبات کرده‌اند. در سال ۱۹۹۱ کوزا^۹ و در سال ۱۹۹۲، کریشاکومار^{۱۰} از الگوریتم ژنتیک برای برنامه‌نویسی کامپیوتر و حل مسائل مهندسی استفاده کرده‌اند.^[۱۴]

۱.۱.۵ مفاهیم اولیه در الگوریتم ژنتیک

۱.۱.۵.۱ کد کردن

الگوریتم ژنتیک به جای اینکه بر روی پارامترها یا متغیرهای مسئله کار کند، با شکل گذشته‌ی آنها به‌طور مناسب سروکار دارد. متداول‌ترین روش کدگذاری، استفاده از اعداد باینری است، که در آن پارامترها با دنباله‌های مناسب از اعداد ۰ و ۱ جایگزین می‌شوند.

۲.۱.۵ رشته

یک رشته، دنباله‌ی از بیت‌هاست که به‌عنوان شکل گذشته‌ی یک جواب ممکن (مناسب یا نامناسب) از مسئله‌ی موردنظر است.

۳.۱.۵ جمعیت

مجموعه‌ی از رشته‌ها را جمعیت گویند. یکی از ویژگی‌های الگوریتم ژنتیک این است که به جای تمرکز بر روی یک نقطه از فضای جست‌وجو یا یک رشته، بر روی جمعیتی از رشته‌ها کار می‌کند.

۴.۱.۵ مقدار برازندگی

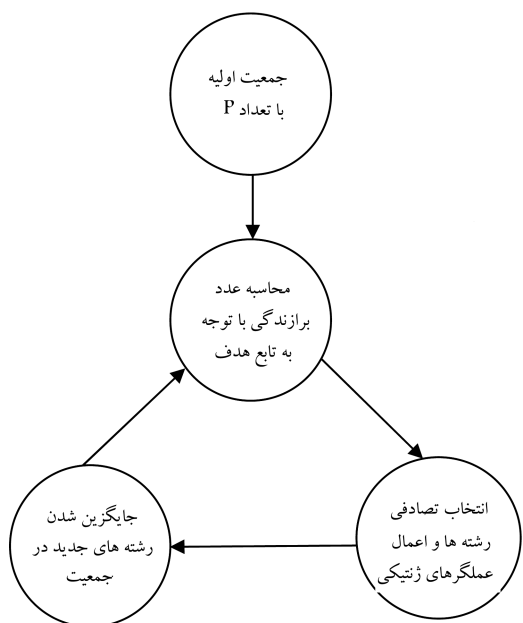
مناسب بودن یا نبودن جواب، با معیاری که از تابع هدف به‌دست می‌آید، سنجیده می‌شود. هر چه یک جواب مناسب‌تر باشد، مقدار برازندگی بیشتری دارد. برای آنکه شانس بقای چنین جوابی بیشتر شود، احتمال بقای آن متناسب با مقدار برازندگی آن در نظر گرفته می‌شود. بنابراین رشته‌ی که برازنده‌تر است، با احتمال بیشتری در تولید رشته‌های جدید شرکت می‌کند.

به‌طور خلاصه در الگوریتم ژنتیک ابتدا متغیرهای مسئله‌ی موردنظر و تعداد جواب‌های ممکن برای هر متغیر تعیین می‌شود. متغیرها با توجه به تعداد جواب‌های ممکن آنها به کد باینری تبدیل و سپس متغیرهای گذشته، در یک رشته پشت سر هم قرار داده می‌شوند. بدین ترتیب، هر رشته، یک نقطه از فضای حل را نشان می‌دهد. نمودارگردشی اجرای الگوریتم ژنتیک در حالت کلی در شکل ۷ نشان داده شده است.

در هر دور محاسباتی، ۳ عمل‌گر اصلی روی رشته‌ها عمل می‌کنند که عبارت‌اند از: دو عمل‌گر ژنتیکی متفاوت و عمل‌گر انتخاب.

۵.۱.۵ عمل‌گر ترکیب (Crossover)

برای ترکیب، دو رشته به‌طور تصادفی و با احتمال P_c از جمعیت انتخاب می‌شود و سپس در طول ۲ رشته، یک نقطه‌ی تعویضی مشترک به‌طور تصادفی تعیین و



شکل ۷. سیکل کلی اجرای الگوریتم ژنتیک.

جای ادامه‌ی ۲ رشته در این نقطه‌ی مشترک با هم عوض می‌شود، که این روش را ترکیب یک نقطه‌ی می‌نامند. اگر تعداد نقاط تعویض ۲ یا بیشتر باشد، به ترتیب آنها را ترکیب دو نقطه‌ی می‌یا چند نقطه‌ی می‌گویند، که معادل آن است که عمل ترکیب یک نقطه‌ی در دو یا چند مرحله انجام شود.^[۱۶،۱۵]

۶.۱.۵ عملگر جهش (Mutation)

رشته‌هایی که تحت عمل ترکیب قرار گرفته‌اند، با احتمال P_m عمل‌گر جهش بر روی آنها اعمال می‌شود. جهش روی یک کاراکتر به‌صورت تغییر تصادفی آن به یکی از کاراکترهای موجود در مجموعه‌ی الفبای کاراکترها انجام می‌شود.

مثلاً اگر رشته‌ها به‌صورت اعداد باینری به طول L کدبندی شده باشند، یک عدد تصادفی $K \in [1, L]$ با توزیع یکنواخت تولید می‌شود. سپس در عدد باینری موردنظر که L عنصر دارد، K مین عنصر را مشخص می‌کند و در صورت صفر بودن به ۱ و در صورت ۱ بودن به صفر تبدیل می‌شود. توسط دو عمل‌گر ترکیب و جهش، رشته‌های جدیدی به نام رشته‌های فرزند تولید می‌شوند.^[۱۶،۱۵]

۷.۱.۵ مکانیسم انتخاب

پس از تولید رشته‌های فرزند توسط عمل‌گرهای الگوریتم ژنتیک، مجموعه‌ی از رشته‌ها برای دور محاسباتی بعد با تعدادی برابر جمعیت اولیه تعیین می‌شوند. این مجموعه تشکیل شده از کلیه‌ی رشته‌های فرزند (با تعداد $P_c \times P$)، که تحت عمل ترکیب و جهش قرار گرفته‌اند) و تعدادی از رشته‌های مرحله‌ی قبل ($P - P_c \times P$) است. انتخاب این تعداد از رشته‌های اولیه به‌طور تصادفی از بین رشته‌های با عدد برازندگی بالاتر انجام می‌شود و این مرحله را تکثیر می‌گویند.

گلدبرگ روش دیسک‌گردان را برای تکثیر ارائه داده است،^[۱۵] که در آن، یک دیسک که سطح آن متناسب با برازندگی هر رشته تقسیم‌بندی شده است، در مقابل یک نشانه می‌چرخد تا بالاخره متوقف شود و یکی از سطوح در مقابل نشانه قرار گیرد (شکل ۸). به این ترتیب یک رشته انتخاب می‌شود. با تکرار به دفعات مناسب می‌توان رشته‌های لازم برای اعمال عمل‌گرهای ژنتیک را انتخاب کرد (تکثیر با تکرار). شرط خاتمه‌ی الگوریتم را می‌توان تعداد مشخصی تکرار یا رسیدن به مقدار

است و چنانچه در این مورد خطایی صورت گیرد، هدف‌های یادشده تأمین نخواهد شد. در صورت استفاده از ضریب نامناسب، به‌عنوان مثال ممکن است طرحی ضریب اطمینان واحد داشته باشد و فقط به دلیل هزینه کمتر نسبت به طرحی که ضریب اطمینان مطلوب دارد، شانس بیشتری برای بقا و شرکت در ادامه‌ی فرایند بهینه‌سازی پیدا کند و یا طرحی هزینه‌ی زیادی داشته باشد، ولی به دلیل داشتن ضریب اطمینان بیشتر از میزان مطلوب، مقدار تابع هدف آن به‌صورت غیرمنطقی کاهش یابد و احتمال شرکت آن در تولید نسل بعد افزایش یابد. باید توجه کرد که ضریب جریمه علاوه بر موارد یادشده نقش دیگری نیز دارد و آن هم مقیاس‌کردن مقدار هزینه و پارامتر جریمه (جمله‌ی دوم در رابطه‌ی ۲۶) است. در واقع می‌توان این ضریب را دارای واحدی مشابه واحد محاسبه‌ی هزینه‌ها در نظر گرفت و در تعیین آن باید دقت کرد که تابع هزینه، نقش اصلی را در تابع هدف و انتخاب طرح بهینه داشته باشد.

با توجه به فرایند اجرایی حایل‌های پایدارشده با میخ‌های تزریقی، تابع هزینه (Cost) به‌صورت رابطه‌ی ۲۷ تعیین می‌شود:

$$\text{Cost} = C_e + C_s + C_g + C_{sh} \quad (27)$$

که در آن، C_e هزینه‌ی حفاری چاله‌ها، C_s هزینه‌ی فولاد مصرفی برای میخ‌ها، C_g هزینه‌ی تزریق ملات، و C_{sh} هزینه‌ی اجرای رخپوش (شامل بتن پاشیده و شبکه‌ی فلزی) است.

در یک پروژه‌ی میخ‌کوبی خاک، پارامترهای هزینه‌ی دیگری مانند تجهیز کارگاه، استقرار دستگاه‌ها، و... نیز وجود دارد، اما با توجه به اینکه سایر هزینه‌ها برای تمامی طرح‌های ممکن تقریباً مقادیر یکسانی دارند، از آنها صرف‌نظر شده است. همان‌گونه که مشخص است، در برنامه‌ی تهیه‌شده به دنبال کمینه‌کردن تابع هدف هستیم.

۱.۶. الگوریتم حل مسئله

مراحل اجرای الگوریتم (شکل ۹) و محاسبه‌ی تابع هدف میخ‌کوبی خاک به این صورت است:

مرحله‌ی اول: در این مرحله، این اطلاعات به برنامه داده می‌شود:

-- مشخصات هندسی طرح؛

-- مشخصات فیزیکی و مکانیکی خاک؛

-- مقاومت تسلیم فولاد (f_y) و مقاومت فشاری بتن (f'_c);

-- سر بار دیوار.

مرحله‌ی دوم: برنامه در این مرحله، P رشته را به‌طور تصادفی به‌عنوان جمعیت اولیه تولید می‌کند، که هر رشته، نشان‌دهنده‌ی یک طرح پایدارسازی با میخ است. همان‌گونه که ذکر شده است، متغیرهای طراحی بهینه‌ی حایل‌های پایدارشده با میخ شامل: طول (l)، قطر (d)، شیب (i)، فاصله‌های قائم (S_V)، و افقی (S_H) میخ‌ها هستند و بازه‌ی تغییرات پارامترهای ذکرشده به این صورت انتخاب شده است:

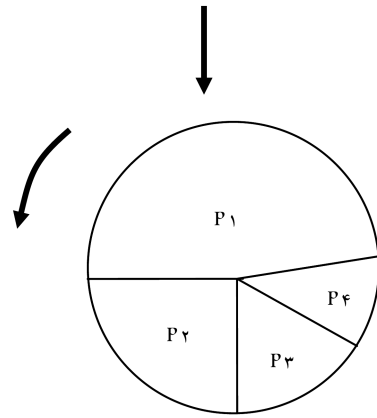
$$0.5H \leq l \leq H \quad (\text{با گام‌های } 0.5 \text{ متر و } H \text{ ارتفاع دیوار است})$$

$$d \in [19, 22, 25, 29, 32, 36, 43] \quad (\text{بر حسب میلی‌متر})$$

$$0^\circ \leq i \leq 20^\circ \quad (\text{با گام‌های } 5 \text{ درجه})$$

$$1 \text{ m} \leq S_V \leq 2 \text{ m} \quad (\text{با گام‌های } 0.25 \text{ متر})$$

$$1 \text{ m} \leq S_H \leq 2 \text{ m} \quad (\text{با گام‌های } 0.25 \text{ متر})$$



شکل ۸. روش دیسگ‌گردان برای انتخاب رشته‌ها.

معینی از برازندگی قرار داد و بهترین رشته از آخرین نسل را می‌توان به‌عنوان خروجی در نظر گرفت.

در این پژوهش پس از انجام آنالیزهای حساسیت و با توجه به سرعت هم‌گرایی به طرح بهینه، احتمال ترکیب $P_c = 0.8$ ، احتمال جهش $P_m = 0.064$ و تعداد جمعیت اولیه $P = 35$ لحاظ شده است.

۶. بهینه‌سازی حایل‌های پایدارشده با میخ با تابع هدف مرکب

مشخصات میخ‌کوبی خاک را به صورتی تعیین می‌کنیم که تابع هزینه‌ی آن تحت شرایط طراحی و اجرایی کمترین مقدار را داشته باشد. بدین منظور بردار متغیرهای طراحی (D^T) را به صورت $D^T = d, l, i, S_V, S_H$ در نظر می‌گیریم که d ، l و i به ترتیب، قطر، طول و شیب میخ‌ها و S_V و S_H ، فاصله‌گذاری قائم و افقی آنهاست. از آنجایی که باید کمینه‌ی ضریب اطمینان لازم برای پایداری کلی وجود داشته باشد، تابع هدف با ترکیب این قید و تابع هزینه، به‌صورت رابطه‌ی ۲۶ شکل می‌گیرد:

$$F(D^T) = \text{Cost} + S_g(FSGD - FSG) \quad (26)$$

که در آن، $FSGD$ کمینه‌ی ضرایب اطمینان لازم برای پایداری کلی، FSG ضریب اطمینان پایداری کلی طرح موردنظر و S_g ضریب جریمه‌ی مربوط به این قید است. این ضریب با انجام تحلیل‌های لازم طوری تعریف شده است که مقدار تابع هدف برای رشته‌های (طرح‌های) با ضریب اطمینان کمتر از واحد، بسیار زیاد است، در نتیجه هیچ شانس بقا و شرکت در تولید نسل بعد نداشته باشند، شانس سایر طرح‌های با ضریب اطمینان کمتر از حد مطلوب، به نسبت این اختلاف کاهش یابد، و نیز ضریب اطمینان بیشتر از مقدار لازم باعث بهبود مختصر تابع هدف شود. در واقع هدف از تعریف پارامتر جریمه این بوده است که اولاً طرح‌های با ضریب اطمینان کمتر از واحد حذف شوند، ثانیاً چنانچه ضریب اطمینان مربوط به یک طرح اندکی کمتر از ضریب اطمینان مطلوب باشد، از آن طرح صرف‌نظر نشود و با در نظر گرفتن مقداری افزایش در تابع هدف، شانس شرکت در تولید نسل بعد را داشته باشد. ثالثاً اگر دو طرح با مقدار هزینه‌ی بسیار نزدیک به هم وجود داشته باشد، طرحی که ضریب اطمینان بالاتری دارد، مقدار تابع هدف کمتر و در نتیجه شانس بیشتری برای تولید رشته‌های نسل بعد داشته باشد. تعیین مقدار مناسب ضریب جریمه بسیار مهم

این مرحله، طرح با کمترین تابع هدف به‌عنوان جواب مسئله معرفی می‌شود. مرحله‌ی دهم: برای تولید نسل جدید، پس از تعیین برازندگی رشته‌ها، عملگر ترکیب و جهش بر روی آنها اعمال می‌شود.

در تمام مراحل، که رشته‌های جدید تولید می‌شوند، قرارگرفتن متغیرهای طراحی در محدوده‌ی موردنظر کنترل می‌شود.

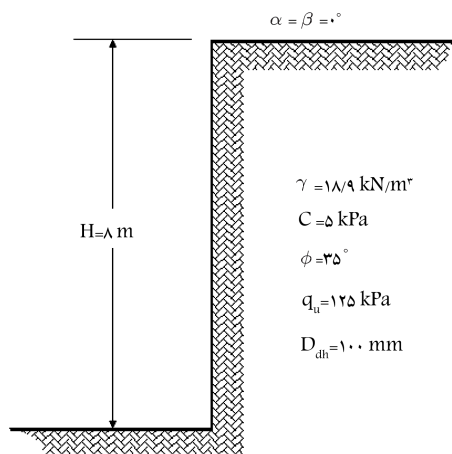
مرحله‌ی یازدهم: رشته‌های جدیدی که با استفاده از عملگرهای ترکیب و جهش ایجاد شده‌اند، دیکدشده، کنترل‌های لازم و طراحی رخیوش برای آنها صورت می‌گیرد. بار دیگر تابع هدف برای هر یک از رشته‌ها محاسبه می‌شود و در واقع مراحل ۳ تا ۱۰ یک چرخه را تشکیل می‌دهند، و به تعداد مناسب تکرار می‌شوند.

۷. مطالعه‌ی موردی

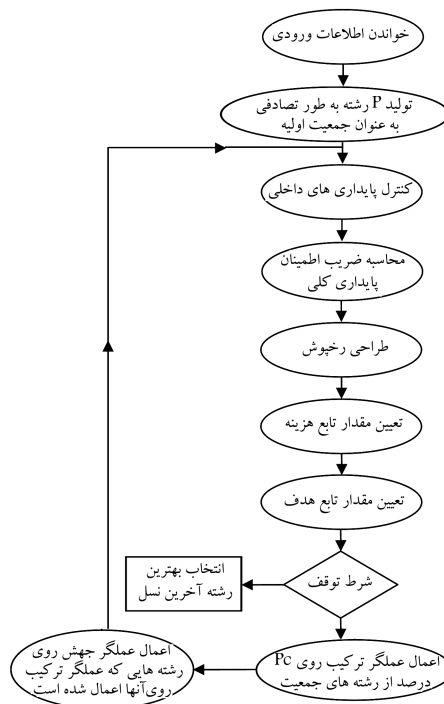
هدف در این مطالعه آن است که با توجه به شرایط هندسی و نیز مشخصات خاک در شکل ۱۰ و با در نظر گرفتن طول ۱۰ متر برای دیوار، متغیرهای طراحی میخ‌کوبی خاک به کمک فرایند یادشده، طوری یافت شوند که ضمن تأمین پایداری، تابع هدف آن کمینه شود.

منحنی تغییرات بهترین تابع هدف در هر نسل در مقابل تعداد تکرار (تعداد نسل‌ها) در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود. در این نوع مسائل، نمودار شبه‌پله‌یی قابل انتظار و معمول است. در بسیاری از قسمت‌های نمودار مذکور، که به ظاهر به‌صورت پله‌یی مشاهده می‌شود، تغییر در تابع هدف وجود دارد؛ اما بسیار اندک و در واقع شیب این تغییرات بسیار کم است. در طول فرایند بهینه‌سازی و با اعمال عملگرهای الگوریتم ژنتیک، جهش در جهت کاهش مقدار تابع هدف، در هر چند مرتبه تولید نسل و جست‌وجو یک بار اتفاق می‌افتد. همچنین با توجه به شکل مذکور، در مراحل اولیه‌ی اجرای برنامه، مقدار تابع هدف با سرعت زیادی کاهش می‌یابد و در انتها تغییرات این تابع خیلی کم می‌شود. دلیل این امر را می‌توان تنوع زیاد رشته‌ها در مراحل اولیه دانست، که با افزایش تعداد تکرار، رشته‌ها به سمت نقطه‌ی بهینه هم‌گرا می‌شوند و تنوع آنها نیز کم می‌شود.

پس از تکرار ۳۰ نسل جمعیت، مشخصات طرح بهینه‌ی نهایی به این صورت



شکل ۱۰. مشخصات مطالعه‌ی موردی.



شکل ۹. نمودار گردش اجرای مراحل برنامه‌ی بهینه‌سازی میخ‌کوبی خاک.

مرحله‌ی سوم: در این مرحله پایداری میخ‌ها در مقابل از جا درآمدگی و کشش، با توجه به توضیحات ذکرشده، کنترل می‌شود. در صورتی که برای میخ یا میخ‌هایی، ضریب اطمینان لازم وجود نداشته باشد، نیروی تقویتی معادل آنها برابر با صفر در نظر گرفته می‌شود و به‌عبارت دیگر، میخ‌های مذکور حذف می‌شوند.

مرحله‌ی چهارم: پس از کنترل پایداری‌های داخلی، ضریب اطمینان پایداری کلی برای هر رشته از جمعیت، براساس فرایند یادشده تعیین می‌شود.

مرحله‌ی پنجم: در این مرحله، برای هر رشته از جمعیت، براساس روش توضیح داده‌شده در بند ۴، رخیوش طراحی می‌شود.

مرحله‌ی ششم: پس از طی مراحل ذکرشده، تابع هزینه‌های اجرایی پایداری با میخ، برای هر رشته از جمعیت براساس فهرست بهای واحد پایه‌ی رشته‌ی راه، باند فرودگاه و زیرسازی راه‌آهن سال ۱۳۹۲^[۱۷] و نیز فهرست بهای واحد پایه‌ی رشته‌ی سدسازی سال ۱۳۹۲^[۱۸] محاسبه می‌شود.

مرحله‌ی هفتم: در این مرحله، برای هر رشته از جمعیت، با توجه به تابع هزینه و ضریب اطمینان پایداری کلی که در مراحل قبل محاسبه شده‌اند و با استفاده از رابطه‌ی ۲۶، مقدار تابع هدف تعیین می‌شود.

مرحله‌ی هشتم: در هر دور محاسباتی، رشته‌های جمعیت براساس مقادیر تابع هدف، از کوچک به بزرگ مرتب می‌شوند. سپس به هر رشته یک عدد برازندگی نسبت داده می‌شود، که این عدد مثبت است و احتمال انتخاب شدن رشته‌ها را (در مرحله‌ی ۱۰) تعیین می‌کند. برای رشته‌ی اول که کمترین مقدار تابع هدف را دارد، عدد $(p \times (P_1 + 1) / 2)$ ؛ برای رشته‌ی دوم عدد $((p - 1) \times ((p - 1) + 1) / 2)$ ؛ برای رشته‌ی سوم عدد $((p - 2) \times ((p - 2) + 1) / 2)$ و... و برای رشته‌ی آخر عدد ۱ به‌عنوان اعداد برازندگی در نظر گرفته می‌شوند، که در آنها، p تعداد رشته‌های جمعیت است.

مرحله‌ی نهم: در این مرحله، شرایط توقف برنامه کنترل می‌شود. در این پژوهش، شرط توقف، تعداد تکرار است و اجرای برنامه در تکرار ۳۰ام متوقف می‌شود. در

$$d = 25\text{mm}, l = 5.75\text{m}, i = 15^\circ, S_V = 1.75^\circ\text{m},$$

$$S_H = 1.75^\circ\text{m}, \text{Cost} = 3,9657 \times 10^4 \text{ Rials}$$

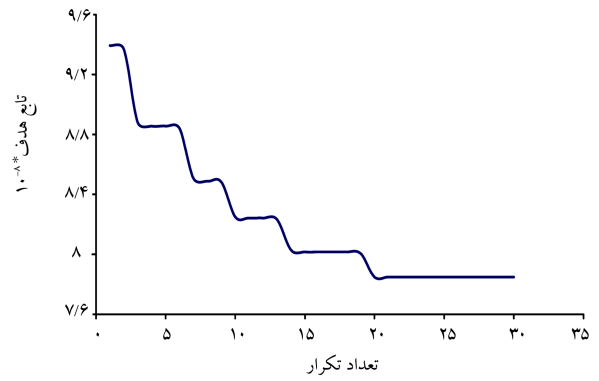
از مقایسه‌ی دو طرح مذکور نتیجه می‌شود که طی فرایند بهینه‌سازی، کاهش هزینه‌ی برابر با ۱۹/۶۸٪ ایجاد شده است.

حال برای اطمینان از بهینه‌بودن طرح نهایی، نمودار تغییرات تابع هدف در مقابل هر یک از پارامترهای طراحی رسم می‌شود. بدین منظور هر بار یکی از پارامترها تغییر داده می‌شود، در حالی که سایر پارامترها در مقدار بهینه‌ی خود ثابت هستند. این نمودارها را می‌توان در شکل ۱۲ مشاهده کرد.

همان‌گونه که در نمودارهای شکل ۱۲ مشاهده می‌شود، به ازاء مقدار بهینه‌ی هر یک از متغیرهای طراحی، تابع هدف کمترین مقدار خود را دارد، که این نشان‌دهنده‌ی انتخاب صحیح طرح بهینه توسط برنامه است. با تغییر نقطه‌ی بهینه، یا هزینه افزایش می‌یابد و یا شرایط پایداری تأمین نمی‌شود و در هر دو صورت، مقدار تابع هدف افزایش خواهد یافت. در هر یک از این نمودارها، نقاطی که مقدار تابع هدف در آنها با اختلاف قابل ملاحظه‌ی بیش از سایر نقاط است، نشان‌دهنده‌ی طرح‌هایی است که فاقد شرایط پایداری هستند و پارامتر جریمه به آنها اعمال شده است.

۱.۷. بررسی حساسیت‌های قیمتی میخ‌کوبی خاک

همان‌گونه که پیشتر یاد شده است، در این پژوهش هزینه‌های اجرایی براساس قیمت‌های



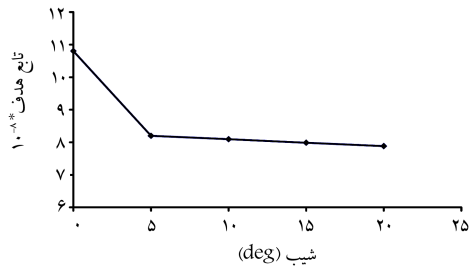
شکل ۱۱. نمایش تغییرات بهترین تابع هدف در هر نسل در مقابل تعداد تکرار.

معرفی می‌شود:

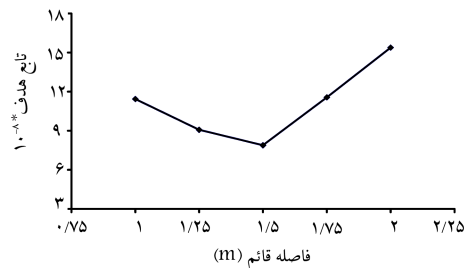
$$d = 22\text{mm}, l = 5.75\text{m}, i = 2^\circ, S_V = 1.75^\circ\text{m},$$

$$S_H = 1.75^\circ\text{m}, \text{Cost} = 3,3136 \times 10^4 \text{ Rials}$$

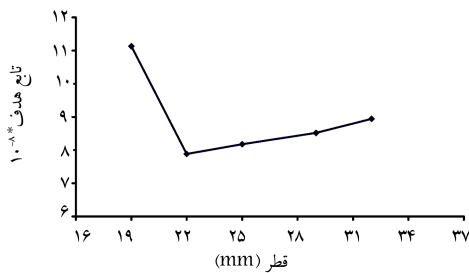
همین مسئله به‌عنوان یک مثال طراحی در مرجع [۹] نیز مورد بررسی قرار گرفته و مشخصات طرح به این صورت ارائه شده است:



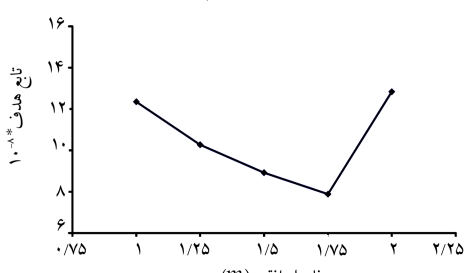
(ب) شیب میخها؛



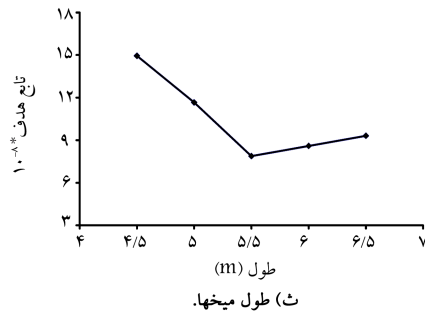
(الف) فاصله گذاری قائم میخها؛



(ت) قطر میخها؛



(ب) فاصله گذاری افقی میخها؛

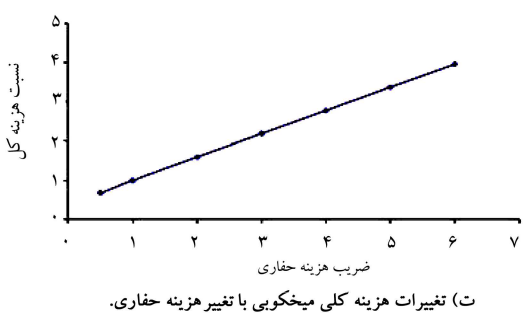
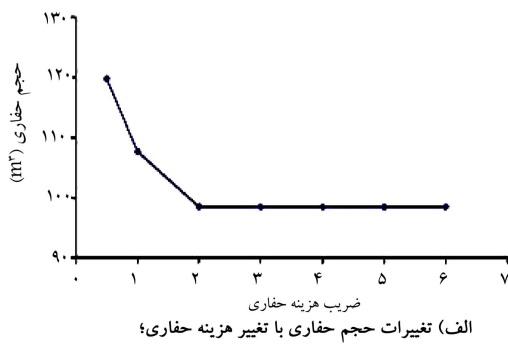
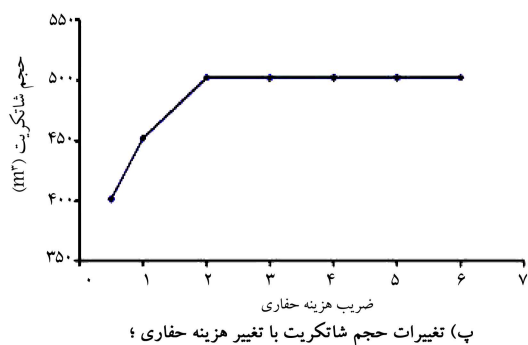


(ث) طول میخها.

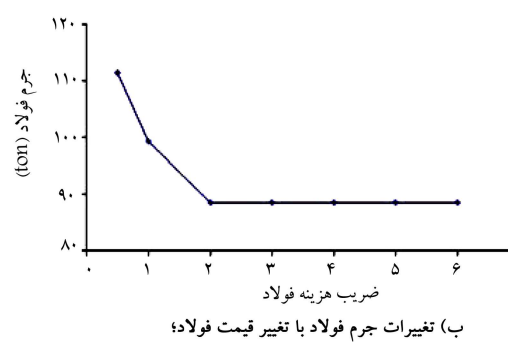
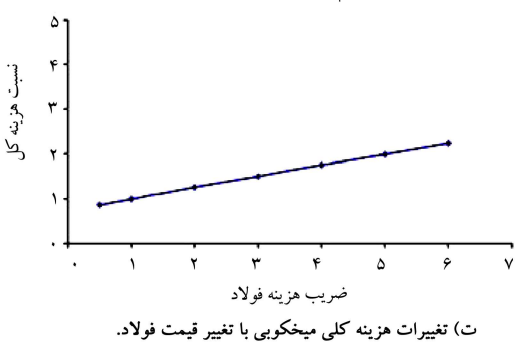
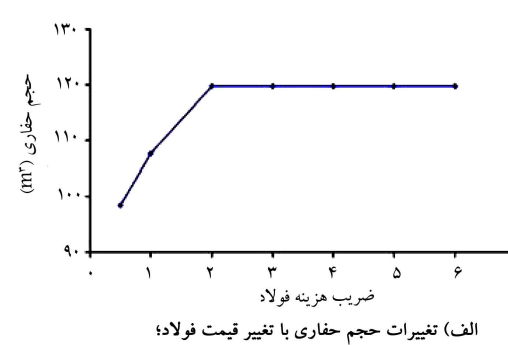
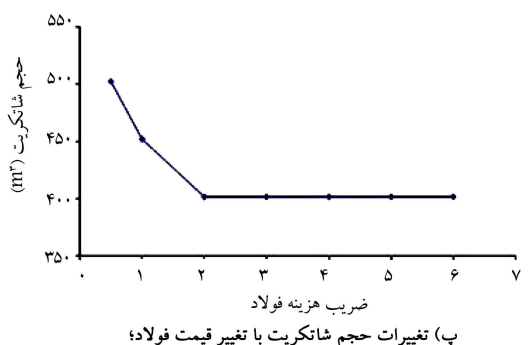
شکل ۱۲. نمایش تغییرات تابع هدف نسبت به پارامترهای طراحی.

برای این مطالعه، دیواری با ارتفاع ۲۰ متر، طول ۱۰۰ متر و زاویه‌ی شیب ۵ درجه نسبت به امتداد قائم در نظر گرفته شده و مشخصات فیزیکی و مکانیکی خاک نیز به این ترتیب فرض شده است: وزن مخصوص 18.9 kN/m^3 ، چسبندگی 5 kPa ، زاویه‌ی اصطکاک داخلی 30° و مقاومت پیوستگی 100 kPa . شکل‌های ۱۳ الی ۱۵، روند تغییرات احجام اجرایی با تغییر قیمت‌ها و نیز چگونگی تغییرات نسبت هزینه‌ی میخ‌کوبی براساس قیمت‌های ضریب‌دار به هزینه بر مبنای قیمت‌های سال ۱۳۹۲ (برای طرح‌های بهینه‌ی مربوطه) را نشان می‌دهند.

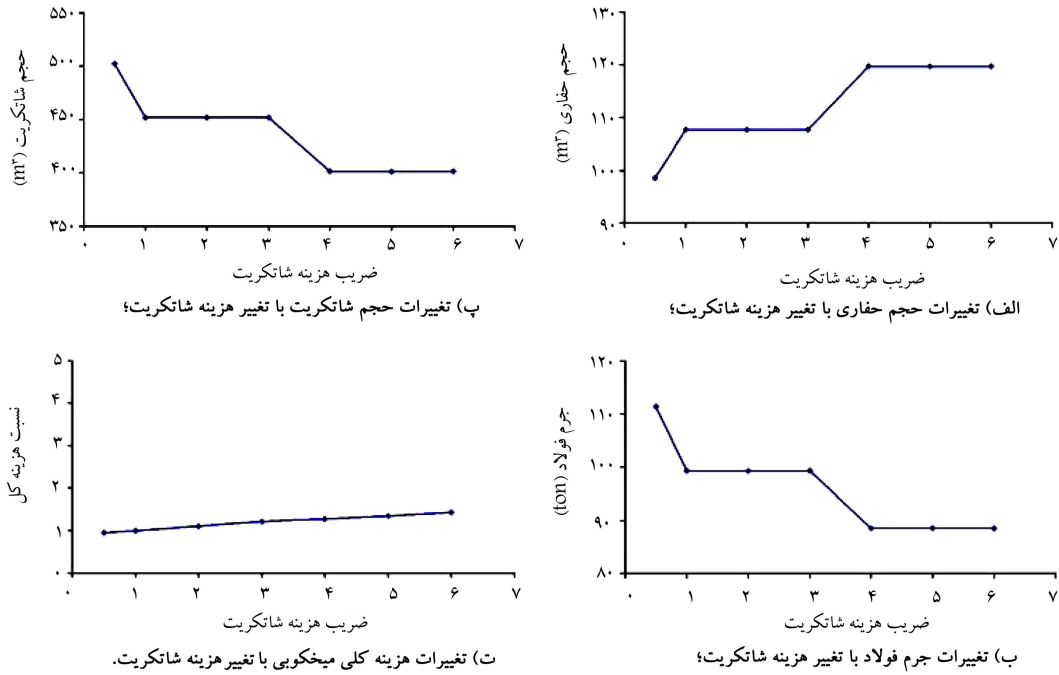
سال ۱۳۹۲ تعیین شده است. در این قسمت ۳ پارامتر مهم در تعیین هزینه‌ی میخ‌کوبی خاک شامل هزینه‌ی حفاری چاله‌ی میخ‌ها (a)، قیمت فولاد (b) و هزینه‌ی اجرای شاتکریت (c) در نظر گرفته شده است. با اعمال ۷ ضریب ۰/۵، ۱، ۲، ۳، ۴، ۵ و ۶ به آنها، حساسیت طراحی بهینه نسبت به تغییر قیمت‌ها مورد بررسی قرار گرفته است؛ بدین صورت که هر بار یکی از این پارامترها به عنوان متغیر انتخاب شده و دو پارامتر دیگر ثابت بوده‌اند (با ضریب قیمتی برابر با ۱) و به ازاء هر یک از این تغییرات، یک مسئله‌ی بهینه‌سازی تعریف شده است.



شکل ۱۳. نمایش تغییرات احجام اجرایی با تغییر هزینه‌ی حفاری چاله‌ی میخ‌ها.



شکل ۱۴. نمایش تغییرات احجام اجرایی با تغییر قیمت فولاد.



شکل ۱۵. نمایش تغییرات احجام اجرایی با تغییر هزینه شاتکریت.

جدول ۱. مشخصات طرح‌های بهینه در تحلیل حساسیت‌های قیمتی.

شماره مسئله	هزینه‌ها			طرح بهینه		شیب میخ‌ها (°)	فاصله گذاری قائم (m)	فاصله گذاری افقی (m)	قطر میخ‌ها (mm)	طول میخ‌ها (m)
	شاتکریت	فولاد	حفاری چاله‌ها	فاصله گذاری قائم (m)	طول میخ‌ها (m)					
۱	c	b	۰٫۵a	۱٫۵°	۱٫۵°	۱۷٫۵	۲۹	۱۷٫۵	۱۵	
۲	c	b	a	۱٫۵°	۱٫۷۵	۱۸٫۵	۳۲	۱۷٫۵	۱۰	
۳	c	b	۲a	۱٫۷۵	۱٫۷۵	۲۰٫۰	۳۶	۱۷٫۵	۱۰	
۴	c	b	۳a	۱٫۷۵	۱٫۷۵	۲۰٫۰	۳۶	۱۷٫۵	۱۰	
۵	c	b	۴a	۱٫۷۵	۱٫۷۵	۲۰٫۰	۳۶	۱۷٫۵	۱۰	
۶	c	b	۵a	۱٫۷۵	۱٫۷۵	۲۰٫۰	۳۶	۱۷٫۵	۱۰	
۷	c	b	۶a	۱٫۷۵	۱٫۷۵	۲۰٫۰	۳۶	۱۷٫۵	۱۰	
۸	c	۰٫۵b	a	۱٫۷۵	۱٫۷۵	۲۰٫۰	۳۶	۱۷٫۵	۱۰	
۹	c	۲b	a	۱٫۵°	۱٫۵°	۱۷٫۵	۲۹	۱۷٫۵	۱۵	
۱۰	c	۳b	a	۱٫۵°	۱٫۵°	۱۷٫۵	۲۹	۱۷٫۵	۱۵	
۱۱	c	۴b	a	۱٫۵°	۱٫۵°	۱۷٫۵	۲۹	۱۷٫۵	۱۵	
۱۲	c	۵b	a	۱٫۵°	۱٫۵°	۱۷٫۵	۲۹	۱۷٫۵	۱۵	
۱۳	c	۶b	a	۱٫۵°	۱٫۵°	۱۷٫۵	۲۹	۱۷٫۵	۱۵	
۱۴	۰٫۵c	b	a	۱٫۷۵	۱٫۷۵	۲۰٫۰	۳۶	۱۷٫۵	۱۰	
۱۵	۲c	b	a	۱٫۵°	۱٫۵°	۱۸٫۵	۳۲	۱۷٫۵	۱۰	
۱۶	۳c	b	a	۱٫۵°	۱٫۵°	۱۸٫۵	۳۲	۱۷٫۵	۱۰	
۱۷	۴c	b	a	۱٫۵°	۱٫۵°	۱۷٫۵	۲۹	۱۷٫۵	۱۵	
۱۸	۵c	b	a	۱٫۵°	۱٫۵°	۱۷٫۵	۲۹	۱۷٫۵	۱۵	
۱۹	۶c	b	a	۱٫۵°	۱٫۵°	۱۷٫۵	۲۹	۱۷٫۵	۱۵	

با توجه به شکل‌های ۱۳، ۱۴ و ۱۵، تغییر هزینه‌ی حفاری چاله‌ها بیشترین و تغییر هزینه‌ی شاتکریت کمترین تأثیر را در تغییرات هزینه‌ی تمام‌شده‌ی میخ‌کوبی خاک دارند. با مقایسه‌ی شیب این منحنی‌ها، اثر تغییر هزینه‌ی حفاری بیش از ۲ برابر فولاد و بیش از ۶ برابر شاتکریت است.

۸. نتیجه‌گیری

نتایجی که در راستای این پژوهش حاصل و به برخی از آنها به طور ضمنی اشاره شده است، به شرح زیر است:

۱. در مسائل بهینه‌سازی تعیین تابع هدف بسیار مهم است و انتخاب بهترین پاسخ بستگی به نوع و دقت تابع هدف دارد. در مورد میخ‌کوبی خاک، با توجه به مطالعات حاضر، تابع هدف مرکب از قیدهای فنی (شرط‌های پایداری) و هزینه‌های اجرایی توصیه می‌شود.
۲. با افزایش هزینه‌ی حفاری چاله‌ها، حجم حفاری کاهش می‌یابد. این کاهش حجم با افزایش فواصل میخ‌ها اتفاق می‌افتد و تا رسیدن به شرایط بحرانی پایداری ادامه می‌یابد.
۳. با افزایش قیمت فولاد، حجم فولاد مصرفی و فواصل میخ‌ها کاهش می‌یابد. این تغییرات تا رسیدن به طرحی، که در بین طرح‌های ممکن کمترین حجم فولاد را دارد، ادامه خواهد یافت.
۴. با افزایش هزینه‌ی شاتکریت، حجم شاتکریت و نیز فواصل میخ‌ها کاهش می‌یابد. این کاهش حجم تا جایی ادامه پیدا می‌کند که هزینه‌ی شاتکریت و هزینه‌ی حفاری چاله‌ها به تعادل برسند.
۵. تغییر هزینه‌ی حفاری چاله‌ها، فولاد و شاتکریت، به ترتیب بیشترین تا کمترین تأثیر را در تغییرات هزینه‌ی تمام‌شده‌ی میخ‌کوبی خاک دارند.
۶. الگوریتم ژنتیک سازگاری مناسبی برای حل مسائل بهینه‌سازی از خود نشان می‌دهد و با تعیین مقادیر مناسب برای پارامترهای الگوریتم ژنتیک، سرعت هم‌گرایی به طرح بهینه افزایش می‌یابد.

همان‌گونه که در شکل‌های ۱۳ الف تا ۱۳ ج مشاهده می‌شود، با افزایش هزینه‌ی حفاری چاله از ۰/۵a تا ۲a، حجم حفاری کاهش یافته است، اما وزن فولاد مصرفی برای میخ‌ها و مسلح‌سازی شاتکریت و نیز حجم بتن مصرفی برای شاتکریت افزایش یافته است. با ادامه‌ی افزایش قیمت (از ۲a تا ۶a) تغییری در این احجام ایجاد نشده است. با توجه به جدول ۱، که نشان‌دهنده‌ی مشخصات طرح‌های بهینه برای این مسائل است، کاهش حجم حفاری با افزایش فواصل میخ‌ها اتفاق می‌افتد؛ بنابراین توقف تغییر احجام در هزینه‌های بیش از ۲a را باید مربوط به تأمین شرایط پایداری دیوار دانست.

براساس شکل‌های ۱۴ الف تا ۱۴ ج، تغییر قیمت فولاد از ۰/۵b تا ۲b، باعث کاهش وزن فولاد و حجم شاتکریت و افزایش حجم حفاری شده است و پس از آن تغییر حجمی مشاهده نمی‌شود. جدول ۱ نشان می‌دهد که کاهش وزن فولاد با کاهش فواصل میخ‌ها همراه است، که از جمله دلایل آن می‌توان به رابطه‌ی مستقیم مقدار فولاد لازم برای مسلح‌سازی رخپوش و سطح تأثیر (فواصل) میخ‌ها اشاره کرد. با توجه به اینکه طرح بهینه‌ی مربوط به قیمت ۲b در مقایسه با سایر طرح‌های ممکن، کمترین حجم فولاد لازم برای میخ‌ها و اتصال آنها به رخپوش را دارد، توقف تغییر طرح‌ها و در نتیجه احجام اجرایی در هزینه‌های بیش از ۲b توجیه می‌شود.

شکل‌های ۱۵ الف تا ۱۵ ج نشان می‌دهند که با افزایش هزینه‌ی شاتکریت، در دو مرحله‌ی (۰/۵c تا c و c تا ۳c) حجم حفاری چاله‌ها افزایش و وزن فولاد مصرفی و حجم شاتکریت کاهش یافته است. با توجه به رابطه‌ی مستقیم فواصل میخ‌ها و نیروی کششی ایجادشده در آنها و در نتیجه ضخامت شاتکریت، کاهش حجم شاتکریت باید با کاهش سطح تأثیر میخ‌ها همراه باشد، که جدول ۱ نیز همین را نشان می‌دهد. روند تغییرات در نمودارهای شکل ۱۵ شباهت‌هایی با نمودارهای شکل ۱۴ دارد، با این تفاوت که تدریجی و کندتر اتفاق افتاده و علت آن تأثیر کمتر هزینه‌ی شاتکریت در هزینه‌ی کلی میخ‌کوبی خاک بوده است، که در ادامه بررسی شده است. باید توجه داشت که رابطه‌ی عکس حجم حفاری چاله‌ها و فواصل میخ‌ها و نیز نقش زیاد هزینه‌ی حفاری در هزینه‌ی کلی طرح، یکی از دلایل مهم نوع تغییرات در شکل‌های مذکور است.

پانوشته‌ها

1. soil nailing
2. nail
3. facing
4. punching shear
5. critical yield line pattern
6. Holland
7. Goldberg
8. Eiben
9. Koza
10. Krishakumar

منابع (References)

1. *Demonstration Project 103- Design and Construction Monitoring of Soil Nail Walls*, Federal Highway Administration, Publication No. FHWA- IF- 99- 026 (1999).
2. Hyung-Joon, S., In-Mo, L. and Seok-Won, L. "Optimization of soil nailing design considering three failure modes", *KSCE Journal of Civil Engineering*, **18**(2), pp. 488-496 (2014).
3. Jelusic, P. and Zlender, B. "Soil-nail wall stability analysis using ANFIS", *ACTA Geotechnica Slovenica*, pp.

- 61-73 (2013).
4. Banerjee, S., Finney, A., Wentworth, T. and Bahiradhan, M., *Evaluation of Design Methodologies for Soil-Nailed Walls*, Washington State Department of Transportation, 124 p. (1998).
 5. Patra, C.R. and Basudhar, P.K. "Optimum design of nailed soil slopes", *Geotechnical and Geological Engineering*, **23**(3), pp. 273-296 (2005).
 6. Long, J.H., Chow, E., Cording, E.T. and Sieczkowski, W.J. "Stability analysis for soil nailed walls", *Geotechnical Special Publication, ASCE*, **25**, pp. 676-691 (1990).
 7. Sheahan, T.C. and Ho, C.L. "Simplified trial wedge method for soil nailed wall analysis", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, **129**(2), pp. 117-124 (2003).
 8. Jewell, R.A. and Pedley, M.J. "Analysis for soil reinforcement with bending stiffness", *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, **118**(10), pp. 1505-1527 (1992).
 9. *Geotechnical Engineering Circular No. 7- Soil Nail Walls*, Federal Highway Administration, Publication No. FHWA 0- IF- 03- 017 (2003).
 10. Wentworth, T.D. "Distribution of axial forces in soil nails based on interpolation of measured strains", Master of Science in Engineering Thesis, University of Washington, Seattle, WA. (1994).
 11. Pradhan, B., Tham, L.G., Yue, Z.Q., Junaideen, S.M. and Lee, C.F. "Soil-nail pullout interaction in loose fill materials", *International Journal of Geomechanics, ASCE*, **6**(4), pp. 238-247 (2006).
 12. Turner, J.P. and Jensen, W.G. "Landslide stabilization using soil nail and mechanically stabilized earth walls: Case study", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, **131**(2), pp. 141-150 (2005).
 13. *Geotechnical Manual*, Texas Department of Transportation (2006).
 14. Nobakht-Vakili, K. and Fakhimi, A. "Using genetic algorithm to find critical slip surface of soil slopes", Tarbiyat-Modares University of Tehran (1998).
 15. Goldberg, D.E., *Genetic Algorithm in Search, Optimization and Machine Learning*, Addison Weley (1989).
 16. Hejazi, F., Toloue, I. and Jaafar, M.S. "Optimization of earthquake energy dissipation system by genetic algorithm", *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, **28**(10), pp. 796-810 (2013).
 17. *Unit Price List of the Road, Runway and Railway Infrastructure*, Roads and Transportation Category (2013).
 18. *Unit Price List of the Dam Construction*, Water Engineering Category (2013).