

تحلیل پایداری سازه‌های فروشویی توده‌ای با روش جزء به جزء (روشی جدید)

عباس مجدی

استادیار دانشکده مهندسی معدن - پردیس دانشکده‌های فنی - دانشگاه تهران

مهدی امینی چرمهینی

دانشجوی دکتری دانشکده مهندسی معدن - پردیس دانشکده‌های فنی - دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت ۸۳/۴/۷، تاریخ دریافت روایت اصلاح شده ۸۴/۵/۲۴، تاریخ تصویب ۸۴/۹/۵)

چکیده

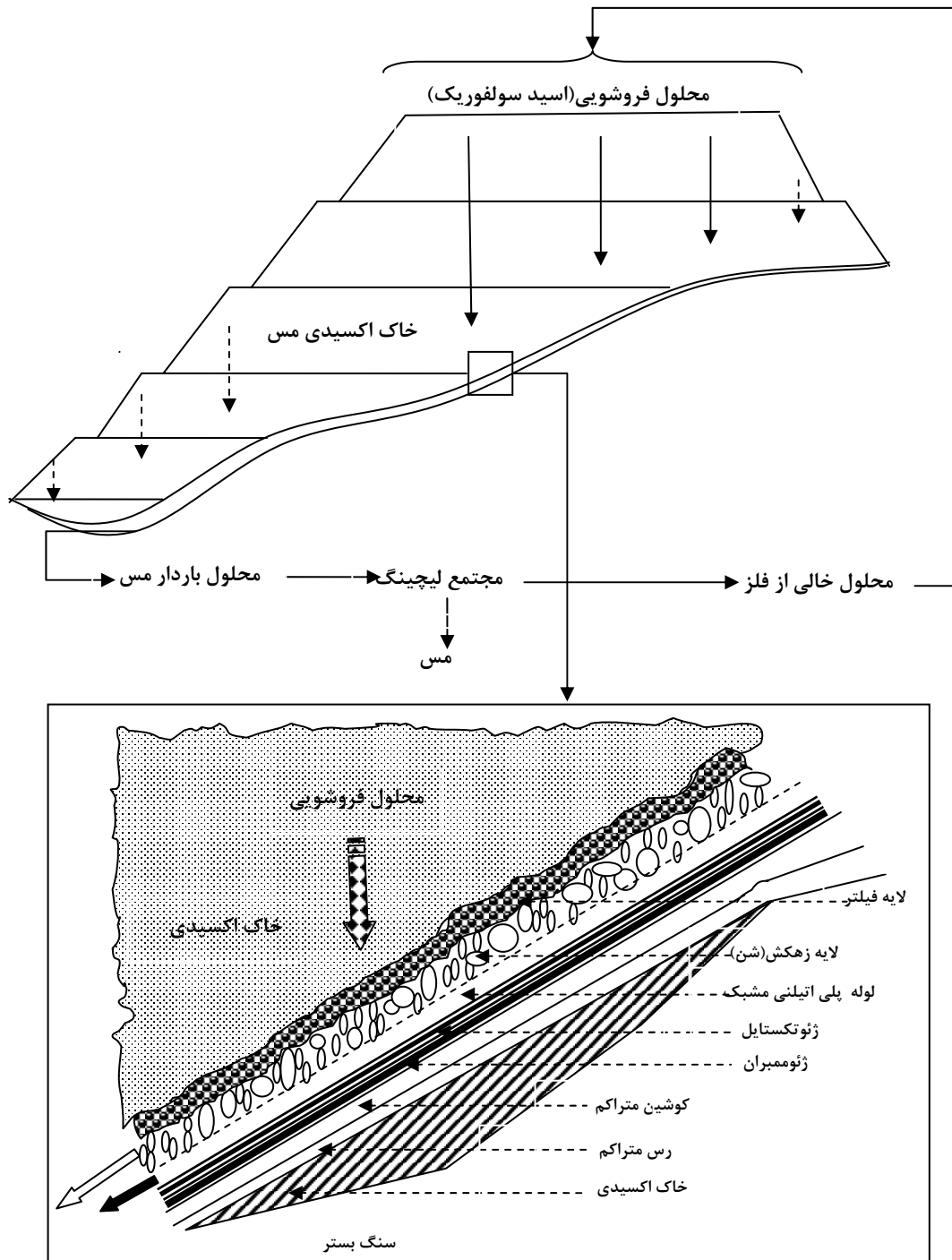
سازه فروشویی توده‌ای واحد نخست فرآیند هیدرومتالورژی در روش فروشویی توده‌ای میباشد. در این سازه‌ها ارتفاع نهایی توده خاک اکسیدی حدود ۸۰ تا ۱۰۰ متر بوده که به صورت پله‌های ۵ تا ۱۵ متری روی بستر شیبدار قرار میگیرد. ناپایداری و لغزش توده‌های فروشویی موجب خسارت‌های سنگین مالی و زیست محیطی میشود. بنابراین بررسی پتانسیل لغزش توده ضروری بوده و در صورت ناپایداری، ارائه طرح پایداری برای آن الزامی است. برای پایداری سازه‌های شیب بخش‌هایی از بستر توده را کاهش می‌دهند. با توجه به اینکه مساحت بستر این سازه‌ها در حد کیلومتر مربع می‌باشد، کاهش شیب بستر بر هزینه خواهد بود. بنابراین تشخیص دقیق محل‌هایی که لازم است شیب آنها کاهش یابد و نیز تعیین میزان کاهش شیب از اهمیت ویژه‌ای برخوردار بوده و موجب صرفه‌جویی اقتصادی می‌گردد. کاربرد تمامی روش‌های تحلیل پایداری شیب-های خاکی در سازه‌های فروشویی توده‌ای، فقط ضریب اطمینان پایداری توده را ارائه می‌دهد و با استفاده از نتایج این روش‌ها نمی‌توان محل‌هایی از بستر سازه که نیاز به کاهش شیب دارند تشخیص و میزان کاهش شیب را تعیین نمود. در این مقاله، روش جدیدی تحت عنوان تحلیل پایداری جزء به جزء ارائه می‌شود. سپس روابط مربوط به کاربرد این روش در سازه‌های فروشویی توده‌ای اشتقاق و چگونگی استفاده از نتایج این روابط مورد بررسی قرار می‌گیرد. با استفاده از نتایج کاربرد این روش در سازه‌های فروشویی توده-ای، می‌توان با صرف زمان کم، بطور دقیق بخش‌هایی از بستر توده که لازم است شیب آنها کاهش یابد، تشخیص داد و میزان کاهش شیب را نیز بدست آورد. از دیگر مزیت‌های این روش نسبت به سایر روش‌های تحلیل پایداری شیب‌های خاکی تعیین ارتفاع مجاز اسید و محل ترک کششی در توده فروشویی می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: تحلیل پایداری جزء به جزء، خاک اکسیدی مس، سازه فروشویی توده‌ای، معدن مس سرچشمه

مقدمه

زهکش به شیب بستر، ضریب نفوذپذیری شن و دبی ورودی اسید بستگی دارد [۱]. برای جلوگیری از بسته شدن روزنه‌های سیستم زهکش، فیلتر مناسب مورد استفاده قرار می‌گیرد. روی فیلتر لایه‌های خاک معدنی به ضخامت ۵-۱۵ متر قرار گرفته و تحت پاشش اسید قرار می‌گیرند. اسید فلز موجود در ماده معدنی را در خود حل کرده و از طریق لایه زهکش به خارج از توده انتقال می‌دهد [۲]. محلول باردار^۳ برای استحصال مس به واحد لیچینگ فرستاده می‌شود. در این واحد مس از محلول جدا شده و اسید خالی از فلز^۴ برای شستشوی مجدد به روی سازه باز گردانده می‌شود (شکل ۱).

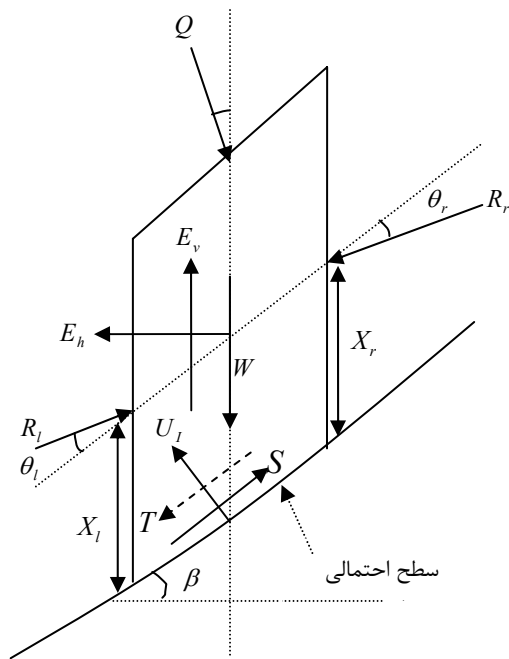
سازه فروشویی، واحد نخست فرآیند هیدرومتالورژی در روش فروشویی توده‌ای می‌باشد. برای ساخت این سازه ابتدا سطح وسیعی در حد کیلومتر مربع و نزدیک به باطله‌انبارهای خاک اکسیدی معدن انتخاب می‌شود. سپس بخش‌های دارای شیب تند کمی تسطیح و تمامی سطح برای جلوگیری از نشست غیر مجاز تحکیم می‌گردد. روی این سطح لایه‌هایی از مواد طبیعی (رس و کوشین متراکم) و مصنوعی (ژئوممبران) قرار داده می‌شود. وظیفه این لایه‌ها ایزوله کردن بستر سازه می‌باشد. برای محافظت از سوراخ‌شدگی ژئوممبران لایه‌ای از جنس ژئوتنکستایل محافظ یا کوشین نامتراکم روی آن پهن می‌گردد. روی لایه محافظ، سیستم زهکش شامل لایه شنی و شبکه لوله‌های پلی‌اتیلینی مشبک نصب می‌شود. ضخامت



شکل ۱: شماتیک فرآیند فروشویی توده‌ای.

طرح فروشویی توده‌ای، در مناطق کوهستانی قرار دارند (مانند مجتمع مس سرچشمه، میدوک و سونگون اهر). در این مناطق یافتن سطحی در حد کیلومتر مربع با شیب (۱۵-۵ درجه) و نزدیک به باطله‌انبارهای خاک اکسیدی معدن، غیر ممکن می‌باشد. بنابراین، بالاجبار، مناطق دارای شیب زیاد انتخاب و جهت اصلاح تسطیح می‌شوند. بطور کلی شیب منطقه باید در حدی باشد که از

ارتفاع نهایی توده خاک اکسیدی [۳۴] در پایان بهره‌برداری از سازه‌های فروشویی، به حدود ۸۰ تا ۱۰۰ متر میرسد که روی سطح شیبدار بستر قرار می‌گیرد. بنابراین تحلیل پایداری و تعیین پتانسیل لغزش توده حائز اهمیت میباشد. بدلیل پایین بودن پارامترهای برشی بین ژئوممبران و ژئوتکستایل، سطح بین این دو ماده، سطح احتمالی لغزش توده می‌باشد [۳۴]. اکثر معادن دارای



شکل ۲: نیروهای وارد بر یک ورقه فرضی در توده لغزشی.

نیروهای وارد به این ورقه عبارتند از:

W : وزن بلوک

Q : نیروهای خارجی وارد بر بلوک

U_l : نیروی فشار آب حفره‌ای

S : نیروی مقاوم برشی

T : برآیند تمامی نیروهای وارد بر ورقه در راستای

نیروی S (نیروی برشی)

E_v : نیروی عمودی ناشی از زلزله

E_h : نیروی افقی ناشی از زلزله

R_l : نیروی وارده از طرف بلوک سمت چپ

R_r : نیروی وارده از طرف بلوک سمت راست

نیروی S (نیروی مقاوم برشی) در اثر اصطکاک و چسبندگی در سطح لغزش بوجود می‌آید. این نیرو همانطوریکه از نامش مشخص است، یک نیروی مقاوم بوده و در مقابل نیروی برشی T ظاهر می‌شود. حد ماکزیمم آن طبق رابطه کلمب به صورت $c.L + N.Tan\phi$ بدست می‌آید. اگر T بزرگتر از حد ماکزیمم فوق باشد، توده ناپایدار، اگر کوچکتر باشد توده پایدار و در شرایط مساوی توده در آستانه لغزش قرار می‌گیرد. در تمامی روش‌های تحلیل پایداری شیب‌های خاکی، ماکزیمم مقدار T (حد نهایی T) در معادلات تعادل

یک طرف سیال باردار به صورت ثقلی و از طریق سیستم زهکش از توده خارج شود و از طرف دیگر پایداری توده معدنی، در مراحل مختلف ساخت و در طول بهره‌برداری، تضمین شود. معمولاً شیب بخش‌های مختلف منطقه‌ای که برای ساخت سازه فروشویی انتخاب می‌شود، متغیر بوده و نیازی به کاهش شیب تمامی بخش‌های منطقه نیست. تاکنون روش خاصی برای تعیین دقیق بخش‌هایی که لازم است شیب آنها کاهش یابد، ارائه نشده است و معمولاً از مدلسازی‌های رایانه‌ای به روش آزمون و خطا استفاده می‌شود که هزینه و زمان زیادی می‌طلبد و جواب آن نیز راه حل بهینه نمی‌باشد. در این مقاله روشی جدید با نام تحلیل پایداری جزءبه‌جزء ارائه می‌گردد. با کاربرد این روش در سازه‌های فروشویی توده‌ای علاوه بر محاسبه ضریب اطمینان پایداری توده می‌توان به طور دقیق بخش‌هایی از بستر زمین را که لازم است شیب آنها برای ساخت توده فروشویی، کاهش یابد تشخیص و میزان کاهش شیب آنها را تعیین نمود. از دیگر مزیت‌های این روش نسبت به سایر روش‌های تحلیل پایداری شیب‌های خاکی، تعیین ارتفاع مجاز اسید و محل ترک کششی در توده فروشویی می‌باشد.

مروری بر روش‌های تعادل حدی و کاربرد آنها در تحلیل پایداری شیب‌های خاکی

تاکنون روش‌های تحلیلی زیادی برای تحلیل پایداری شیب‌های خاکی ارائه شده است. در اکثر این روش‌ها توده لغزشی با صفحاتی موازی با نیروی ثقل به بلوک‌های مجزا تقسیم‌بندی شده و نمودار آزاد نیروهای وارد بر هر بلوک رسم می‌گردند. سپس براساس تعادل نیروها یا گشتاور نیروها و یا تعادل نیرو و گشتاور نیروهای وارد بر هر بلوک، ضریب اطمینان پایداری توده لغزشی محاسبه می‌شود. شکل (۲) نیروهای وارد بر یک ورقه فرضی جدا شده از توده لغزشی را نشان می‌دهد.

بر مبنای معادلات تعادل حدی و بر اساس تعادل نیروهای وارد بر توده قرار گرفته است. در این روش فرض می‌گردد نیروی بین دو بلوک تحت زاویه بلوک فوقانی عمل کند (فرض ساده کننده به منظور "استاتیکی معین نمودن" مسئله). با این فرض، ابتدا توده لغزشی با صفحاتی موازی با نیروی ثقل به بلوک‌های مجزا تقسیم بندی می‌شود. سپس اولین بلوک از کل توده جدا شده و ضریب اطمینان آن برابر ۱ در نظر گرفته می‌شود. در این شرایط با نوشتن معادلات تعادل حدی برای نیروهای وارد بر این بلوک، دو مجهول معادلات یعنی نیروی بین اولین و دومین بلوک توده لغزشی (R_r) و نیروی برشی در سطح لغزش (τ) ، بدست می‌آیند. نیروی R_r ، نیروی معرف^۵ اولین بلوک نامگذاری می‌شود. عکس‌العمل این نیرو به دومین بلوک وارد می‌گردد. اگر عملیات فوق برای دومین بلوک و سپس سایر بلوک‌ها نیز انجام گیرد نیروی معرف تمامی بلوک‌ها بدست می‌آید. با این تفسیر، نتایج تحلیل پایداری جزء به جزء شامل ضریب اطمینان و مجموعه‌ای از نیروهای معرف بلوک‌های تشکیل‌دهنده توده لغزشی خواهد بود. با استفاده از نیروی معرف آخرین بلوک، ضریب اطمینان لغزش توده بدست می‌آید و با استفاده از نیروی معرف سایر بلوک‌ها می‌توان در مورد کاهش شیب بستر تصمیم‌گیری نمود [۶]. روابط مربوط به تحلیل پایداری جزء به جزء در سازه‌های فروشویی توده‌ای در این مقاله اشتقاق می‌گردد.

تفاوت بین روش تحلیل پایداری جزء به جزء و سایر روشهای تعادل حدی (تحلیلی)

روش جزء به جزء نیز مانند سایر روش‌های تحلیل پایداری شیب‌های خاکی بر اساس معادلات تعادل حدی استوار است. ولی با سایر روش‌های مرسوم تفاوت‌های زیر را داراست:

- ۱- نیروی بین دو ورقه تحت زاویه بستر ورقه فوقانی مجاور و به مرکز ثقل ورقه مورد تحلیل وارد می‌شود. با این فرض مقادیر $X_r, X_l, \theta_r, \theta_l$ معلوم می‌گردند.
- ۲- فاکتور ایمنی لغزش توده "مقدمتاً" یک در نظر گرفته می‌شود.
- ۳- ورقه‌ها به صورت مجزا مورد بررسی قرار نمی‌گیرند،

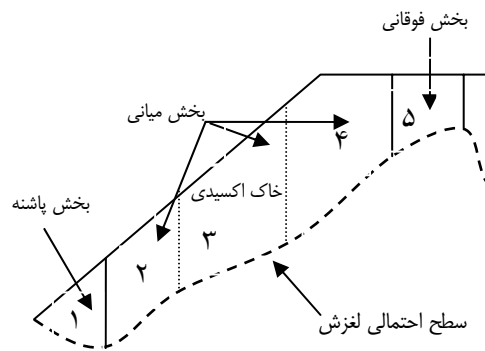
نیروها و گشتاور نیروها وارد گشته و نسبت $\frac{S}{T}$ به عنوان ضریب اطمینان پایداری توده معرفی می‌گردد. بهمین دلیل این روش‌ها را روش‌های "تعادل حدی" نیز می‌نامند [۵]. برای تعیین T و S، میبایستی مقدار، جهت و نقطه اثر تمامی نیروهای وارد بر ورقه معلوم باشد. در شکل (۲) شش مجهول $(R_r, R_l, \theta_r, \theta_l, X_r, X_l)$ وجود دارند ولی بر اساس معادلات تعادل حدی حداکثر سه معادله تعادل (۲ معادله برای تعادل نیروها و ۱ معادله برای تعادل گشتاور نیروهای وارد بر توده) می‌توان نوشت. بنابراین هر یک از بلوک‌ها از نظر استاتیکی نامعین می‌باشد. برای محاسبه ضریب اطمینان لغزش توده، مفروضات ساده کننده‌ای در نظر گرفته می‌شود. با وارد نمودن این مفروضات در بلوک‌ها، هر یک از بلوک‌ها یا مجموعه‌ای از آنها از نظر استاتیکی "معین" و ضریب اطمینان پایداری توده قابل محاسبه می‌گردد. بطوریکه تفاوت بین روش‌های تحلیل پایداری شیب‌های خاکی در "مفروضات ساده کننده" مذکور می‌باشد. در روش فلینیوس (Fellenius, 1936)، نیروهای بین ورقه‌ای صفر در نظر گرفته شده‌اند. در روش ساده شده بیشاب (Simplified Bishop, 1955)، چنین فرض می‌گردد که تفاضل نیروهای برشی بین ورقه‌ای صفر میباشند. در روش سالتان و سید (Sultan & Seedy, 1967)، زاویه نیروهای بین ورقه‌ای با یکدیگر مساوی و برابر $Tan^{-1}\left(\frac{Tan\phi}{f_s}\right)$ در نظر گرفته می‌شود. اسپنسر

(Spencer, 1967)، زاویه نیروهای بین ورقه‌ای را در تمامی بلوک‌ها با یکدیگر مساوی فرض کرده و با استفاده از روش جایگزینی و اغنا نمودن شرایط مرزی مقدار ضریب اطمینان لغزش توده را محاسبه می‌نماید. هیچکدام از مفروضات فوق، کاملاً مبتنی بر واقعیت نبوده و فقط برای "استاتیکی معین نمودن" مسئله در نظر گرفته شده‌اند. بهمین دلیل ضریب اطمینان بدست آمده از روش‌های مذکور نیز با واقعیت اندکی تفاوت دارد [۵].

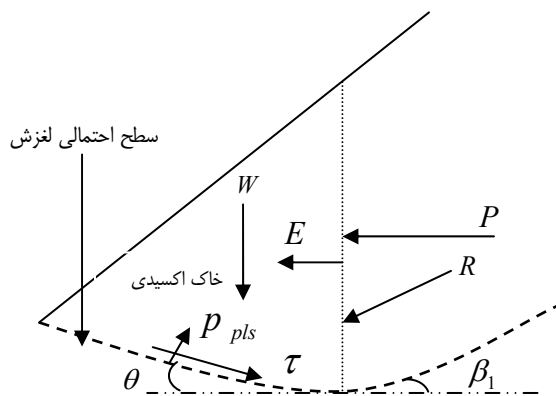
تحلیل پایداری جزء به جزء

روش تحلیل پایداری جزء به جزء که برای اولین بار بوسیله نویسندگان این مقاله ارائه می‌گردد، روشی است تحلیلی، برای تحلیل پایداری شیب‌های خاکی. این روش

بدست می آید [۶]. این نیرو (R)، نیروی معرف بلوک پاشنه می باشد.



شکل ۳: بخش های سه گانه در برش عرضی سازه های فروشویی توده ای برای تحلیل پایداری جزء به جزء.



شکل ۴: تحلیل بلوک بخش پاشنه با احتمال لغزش در مرز کوشین با آستر ژئوممبران.

$$R = \frac{W \cdot (\sin \theta - A \cdot \cos \theta) + (W \cdot (\cos \theta + A \cdot \sin \theta) + P \cdot \sin \theta - P_{PLS} \cdot L) \tan \phi - P \cdot \cos \theta + c \cdot L}{\cos(\beta_1 + \theta) - \sin(\beta_1 + \theta) \cdot \tan \phi} \quad (1)$$

که در آن:

- c : نیروی مقاومت چسبندگی بین کوشین و آستر ژئوممبران
 ϕ : ضریب اصطکاک داخلی بین کوشین و آستر ژئوممبران
 θ : زاویه شیب بلوک پاشنه
 β_1 : زاویه شیب اولین بلوک بخش میانی
 W : وزن بلوک پاشنه
 P : نیروی وارد به بلوک پاشنه به عنوان دیوار حائل
 R : نیروی معرف بلوک پاشنه
 P_{PLS} : نیروی محلول باردار حفره ای
 L : طول بستر بلوک پاشنه
 E : نیروی ناشی از زلزله یا انفجارهای معدن

بلکه نیروهای بین ورقه ای به صورت "تجمعی" در نظر گرفته می شوند.

۴- با استفاده از آخرین نیروی بین ورقه ای (چون حالت تجمعی دارد) ضریب اطمینان پایداری توده بدست می آید.

اشتقاق روابط تحلیل پایداری جزء به جزء برای سازه های فروشویی توده ای

برای تحلیل پایداری سازه های فروشویی توده ای با استفاده از تحلیل پایداری جزء به جزء، سازه به سه بخش عمده زیر تقسیم بندی می شود (شکل ۳):

الف- بخش پاشنه^۶

قسمت ابتدایی هر برش که مشرف به حوضچه های اسید بوده یا روی دیواره های دارای شیب منفی قرار دارند.

ب- بخش میانی^۷

قسمت هایی از برش که از منطقه پاشنه شروع شده و به آخرین بخش متصل می شود. بیشترین عملیات عددی هر برش مربوط به این منطقه می باشد.

ج- بخش فوقانی^۸

آخرین قسمت هر برش به این نام خوانده می شود و معمولاً قسمت های انتهایی توده یا قسمتی از سازه است که جهت شیب زیرسازی سازه تغییر می کند.

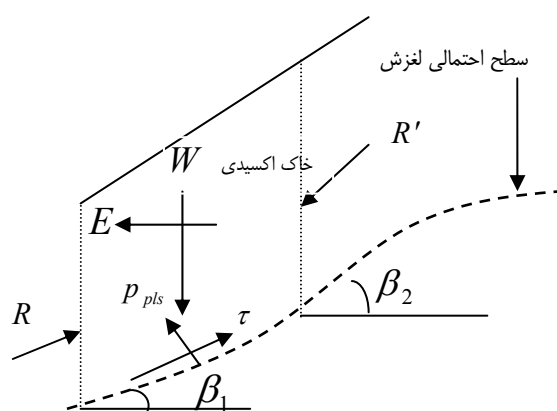
حال اگر بلوک پاشنه (بلوک ۱) از کل توده جدا شده و نمودار آزاد نیروهای وارد بر آن رسم شود (شکل ۴)، با نوشتن معادلات تعادل حدی برای نیروهای وارد بر این بلوک، نیروی بین بلوک های ۱ و ۲ به صورت رابطه ۱

γ : وزن مخصوص خاک اکسیدی در حالت شناور

k_0 : ضریب تنش قائم به افقی در حالت سکون

ϕ' : ضریب اصطکاک داخلی خاک اکسیدی است.

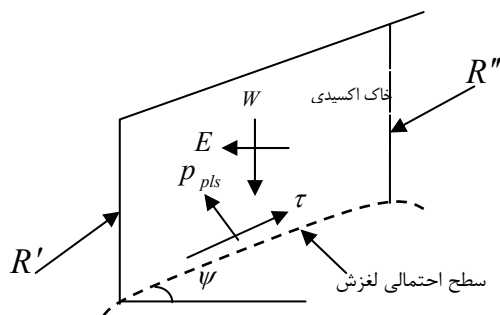
نیروی معرف بلوک پاشنه (R) به اولین بلوک بخش میانی انتقال می‌یابد. با توجه به اینکه مقدار و جهت این نیرو معلوم می‌باشد، بر اساس معادلات تعادل حدی نیروی معرف اولین بلوک بخش میانی قابل محاسبه است. شکل (۵) مبین بلوک بخش میانی همراه با نیروهای وارد بر آن می‌باشد. با نوشتن معادلات تعادل حدی، نیروی معرف این بلوک به صورت رابطه ۶ بدست می‌آید [۶].



شکل ۵: تحلیل بلوک بخش میانی.

$$R' = \frac{R - W \cdot (\sin \beta_1 + A \cdot \cos \beta_1) + W \cdot (\cos \beta_1 - A \cdot \sin \beta_1) \cdot \tan \phi - P_{PLS} \cdot L \cdot \tan \phi + c \cdot L}{\cos(\beta_2 - \beta_1) \pm \sin(\beta_2 - \beta_1) \cdot \tan \phi}$$

(۶)



شکل ۶: تحلیل بلوک بخش فوقانی.

با نوشتن معادلات تعادل حدی برای بلوک فوقانی، نیروی معرف آن به صورت رابطه ۷ قابل محاسبه می‌باشد [۶].

A: شتاب ناشی از انفجارهای معدن یا زلزله بر حسب

شتاب ثقل

مقادیر P_{pls} , P و k_0 و γ از معادلات زیر محاسبه می‌شوند:

$$p = \frac{1}{2} K_0 \gamma_s H_1^2 + K_0 \gamma_s H_1 (H_2 - H_1) + \frac{1}{2} (K_0 \gamma + \gamma_{pls}) (H_2 + H_1)^2$$

(۲)

$$p_{pls} = \gamma_{pls} \times H$$

(۳)

$$k_0 = (1 - \sin \phi')$$

(۴)

$$\gamma = (\gamma_s - \gamma_{pls})$$

(۵)

که در روابط ۲ تا ۵ فوق:

H_1 : ارتفاع اسید در مرز بین بلوک پاشنه و اولین

بلوک بخش میانی

H_2 : ارتفاع خاک اکسیدی در مرز بین بلوک پاشنه با

اولین بلوک بخش میانی

H : میانگین ارتفاع اسید در بلوک پاشنه

γ_s : وزن مخصوص خاک اکسیدی

γ_{pls} : وزن مخصوص محلول باردار

که در آن، β_1 زاویه بستر بلوک مورد تحلیل و سطح افق و β_2 زاویه بستر بلوک بعد از آن و سطح افق می‌باشد. در مخرج کسر، اگر $\beta_1 > \beta_2$ باشد علامت منفی و در صورتیکه اگر $\beta_1 < \beta_2$ باشد، علامت مثبت در نظر گرفته می‌شود. با استفاده از رابطه ۶ میتوان به صورت زنجیره‌ای نیروی معرف تمامی بلوک‌های بخش میانی را محاسبه نمود. نیروی معرف آخرین بلوک بخش میانی به بلوک فوقانی انتقال می‌یابد (شکل ۶).

لازم به ذکر است بلوک هایی از بخش میانی که در مجاورت با بخش فوقانی می‌باشند، در صورت پایدار بودن با این بخش تحلیل می‌شوند.

کاربرد تحلیل پایداری جزء به جزء در سازه های فروشویی توده ای

منفی بودن علامت نیروی معرف بلوک I نشانه ناپایدار بودن بلوک های ۱ تا I و علامت مثبت نشانه پایدار بودن بلوک های ۱ تا I می باشد. بنابراین برای اطمینان از پایداری توده لغزشی کافی است شیب بستر بلوک هایی که علامت نیروی معرف آنها منفی است کاهش یابد و کاهش شیب بستر بلوک هایی که نیروی معرف آنها مثبت است، ضرورتی ندارد [۶]. برای تعیین میزان کاهش شیب بستر این بلوک ها، در رابطه نیروی معرف متناسب با آن بلوک، مقدار نیروی معرف برابر صفر فرض می گردد و زاویه شیب بستر بلوک بدست می آید. تفاضل زاویه بدست آمده و شیب بستر میزان کاهش شیب خواهد بود. که با استفاده از آن میتوان حجم حفاری های مورد نیاز را بدست آورد [۶].

همچنین با استفاده از نیروهای معرف بلوک های تشکیل دهنده توده لغزشی، محل ترک کششی قابل تشخیص است. اگر مقدار نیروی معرف بلوک I مقداری منفی و تا آخرین بلوک بخش میانی ثابت بماند، یا اینکه افزایش یابد (با در نظر گرفتن علامت مثبت و منفی) مقدار نیروی معرف R_1 به نمودار آزاد بلوک I+1 اضافه نمی شود. در این شرایط بلوک های ۱ تا I همگی ناپایدار بوده و بلوک های I+1 تا آخرین بلوک بخش فوقانی پایدارند. یعنی در سطح تماس بلوک I و I+1 ترک کششی بوجود می آید [۶].

از دیگر مزیت های این روش تعیین ارتفاع مجاز اسید در توده می باشد. اگر نیروی معرف آخرین بلوک برابر صفر قرار داده شود مقدار P_{pls} و سپس بر اساس رابطه ۳ مقدار ارتفاع مجاز اسید در توده بدست می آید [۶].

تحلیل مقایسه ای کاربرد روش تحلیل پایداری جزء به جزء با سایر روش های تعادل حدی موجود در سازه های فروشویی توده ای

کاربرد تمامی روش های تحلیل پایداری شیب های خاکی در سازه های فروشویی توده ای، تنها ضریب اطمینان پایداری توده را ارائه میدهد، بطوریکه با استفاده از نتایج روش های تحلیلی مذکور نمیتوان محل هاییکه لازم است شیب آنها کاهش یابد را تعیین و نیز میزان کاهش شیب را محاسبه نمود. در صورتیکه با استفاده از نتایج

$$R'' = (W \cdot (\cos \psi - A \cdot \sin \psi) - P_{PLS} \cdot L) \cdot \tan \phi - W \cdot (\sin \psi + A \cdot \cos \psi) + R'$$

(۷)

در این رابطه:

ψ : زاویه بستر بلوک فوقانی و سطح افق

R' : نیروی معرف آخرین بلوک بخش میانی

R'' : نیروی معرف بلوک فوقانی می باشد.

لازم به ذکر است در صورتیکه مقدار ψ بیشتر از ϕ باشد در معادله بجای آن، مقدار ϕ در نظر گرفته می شود. با توجه به اینکه ضریب اطمینان در روابط ۱، ۶ و ۷ برابر ۱ در نظر گرفته شده است، R'' برابر تفاضل کل نیروی های پایدار و نیروهای ناپایدار توده لغزشی خواهد بود. بنابراین میتوان رابطه ۸ را اشتقاق نمود [۶].

$$R'' = S_f - U \cdot S_f$$

(۸)

در این رابطه:

S_f : کل نیروهای پایدار توده در برش عرضی

$U \cdot S_f$: کل نیروهای ناپایدار توده در برش عرضی می باشد.

بر اساس تعریف، ضریب اطمینان عبارت است از نسبت عوامل پایدار به عوامل ناپایدار توده. بر اساس این تعریف رابطه ۹ بر قرار است.

$$F_s = \frac{S_f}{U \cdot S_f} = \frac{\sum_{i=1}^n S_{f_i}}{\sum_{i=1}^n U \cdot S_{f_i}}$$

(۹)

با جایگذاری رابطه ۸ در ۹، رابطه ۱۰ برای ضریب اطمینان لغزش توده بر اساس روش تحلیل پایداری جزء به جزء بدست می آید [۶].

$$F_s = 1 + \frac{R''}{U \cdot S_f}$$

(۱۰)

در رابطه ۱۰ اگر R'' مقداری منفی باشد فاکتور ایمنی کمتر از واحد خواهد شد و در صورتیکه R'' مثبت شود فاکتور ایمنی از مقدار واحد فزونی خواهد یافت که کاملاً با واقعیت و نتایج سایر روش های تحلیل پایداری شیب های خاکی مطابقت دارد.

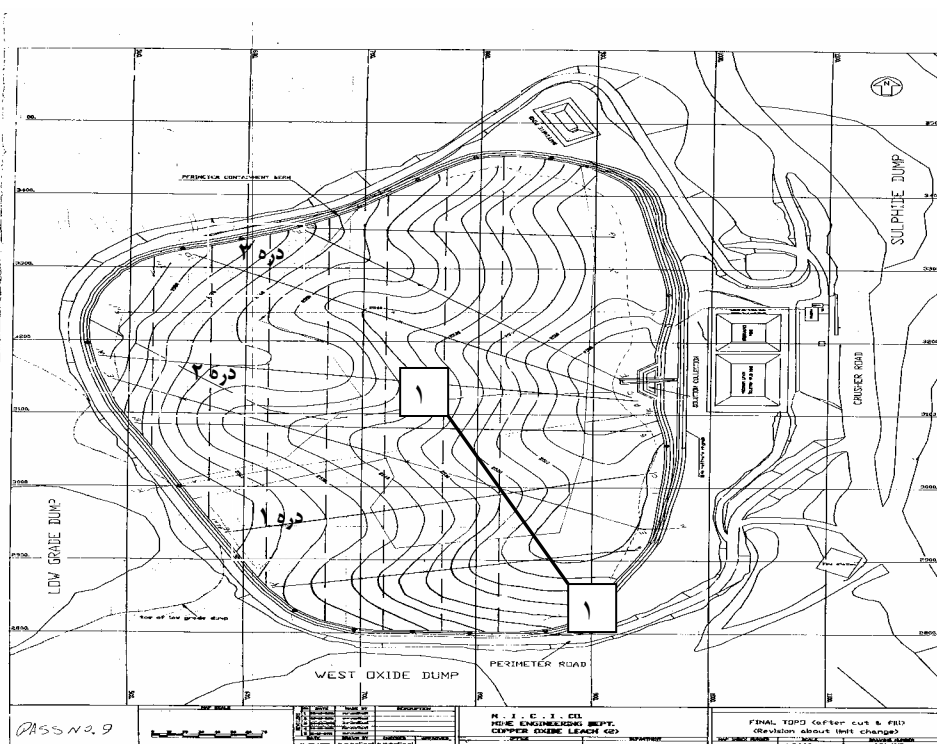
در این دره مورد استفاده قرار گرفت که نتایج این تحلیل در این بخش از مقاله بررسی می‌شود.

شکل (۷) نقشه توپوگرافی بستر سازه را حین نصب آستر ژئوممبران نشان می‌دهد. با توجه به اینکه سطح لغزش معمولاً مرز مشترک آستر ژئوممبران و ژئوتکستایل می‌باشد، خطوط همتراز، همسنگ صفحه لغزش احتمالی توده هستند. نتایج تحلیل پایداری این سازه با نرم افزار Stable نشان داده است که بخشی از توده خاک اکسیدی موجود در این دره ناپایدار می‌باشد [۷]. به منظور ارائه بهتر و مناسبتر نتایج تحلیل پایداری جزء به جزء، همین بخش از سازه فروشویی توده ای با استفاده از تحلیل پایداری جزء به جزء مورد تحلیل قرار گرفت. برای تحلیل پایداری این بخش از سازه، یک مقطع دو بعدی (مقطع ۱-۱) در محل احتمالی ناپایداری مورد بررسی قرار گرفت. شکل (۸) هندسه این مقطع را نشان می‌دهد. پارامترهای مورد نیاز برای تحلیل پایداری جزء به جزء از شکل (۸) و گزارشات آزمون‌های آزمایشگاهی استخراج شد [۸، ۹، ۱۰]. جدول (۱) پارامترهای ژئوتکنیکی دره ۱ سازه فروشویی ۲ مس سرچشمه و جدول (۲) پارامترهای هندسی مقطع ۱-۱ را نشان می‌دهند.

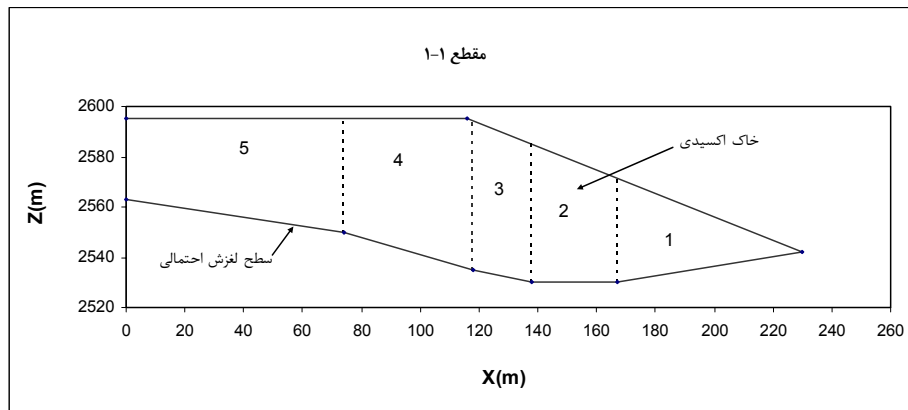
تحلیل پایداری جزء به جزء میتوان علاوه بر محاسبه ضریب اطمینان لغزش توده، محل های از بستر که لازم است شیب آنها کاهش یابد معین و میزان کاهش شیب را نیز محاسبه نمود. از دیگر مزیت‌های این روش نسبت به سایر روشهای تحلیل پایداری شیبهای خاکی تعیین ارتفاع مجاز اسید و بویژه تعیین محل ترک کششی در توده میباشد که روشهای معمول تعادل حدی قادر به تعیین آن نخواهند بود. مقایسه نتایج مثال موردی در انتهای مقاله ارائه خواهد شد.

مثال موردی، دره شماره ۱ سازه فروشویی ۲ مس سرچشمه

سازه فروشویی ۲ مس سرچشمه در سال ۱۳۸۱ در مساحتی حدود ۲۳۰۰۰۰ مترمربع ساخته شد و در سال ۱۳۸۲ به بهره‌برداری رسید. بستر این سازه شامل ۴ دره است که در منطقه کوهستانی شرق معدن قرار دارد. دره شماره ۱ آن که مساحتی در حدود ۸۰۰۰۰ مترمربع دارد، به واحد تحقیقات واگذار شد تا طرح‌های تحقیقاتی مرتبط، در این دره اجرا شوند. تحلیل پایداری جزء به جزء



شکل ۷: نقشه توپوگرافی سازه فروشویی ۲ مس سرچشمه [۶].



شکل ۸: مقطع ۱-۱ دره ۱ سازه فروشویی ۲ مس سرچشمه.

جدول ۱: پارامترهای ژئوتکنیکی دره ۱ سازه فروشویی ۲ مس سرچشمه [۱۰،۹،۸].

پارامتر	A (g)	H (m)	C ($\frac{Kg}{Cm^2}$)	ϕ (Degree)	C' ($\frac{Kg}{Cm^2}$)	ϕ' (Degree)	γ_s ($\frac{gr}{Cm^3}$)	γ_{pls} ($\frac{gr}{Cm^3}$)
مقدار	۰/۱	۴/۵	.۳	۱۵	۰/۳	۳۵	۱/۹۵	۱/۱۵

جدول ۲: پارامترهای هندسی مقطع ۱-۱ دره ۱ سازه فروشویی ۲ مس سرچشمه.

وزن (کیلو نیوتن)	W_1	W_2	W_3	W_4	W_5
	۲۵۲۴۴	۲۷۰۵۹	۲۲۰۱۴	۴۴۰۲۹	۵۴۴۴۴
طول (متر)	L_1	L_2	L_3	L_4	L_5
	۶۴/۱	۲۹	۲۰/۶	۴۶/۴۸	۷۵/۱۳
زاویه (درجه)	θ	β_1	β_2	β_3	ψ
	۱۰/۷۹	۰	۱۴/۰۴	۱۸/۸۳	۱۰

جدول ۴: نیروی معرف آخرین بلوک بخش فوقانی و فاکتور ایمنی پایداری توده لغزشی [۶].

ضریب اطمینان پایداری توده لغزشی به روش جزء به جزء	نیروی معرف آخرین بلوک بخش فوقانی (R'')
۰/۷	-۱۰۲۱۹

ضریب اطمینان بدست آمده برای مقطع مذکور کمتر از ۱ بوده که نشان دهنده ناپایداری توده است. با توجه به جدول (۳)، برای پایدار نمودن توده لازم است شیب بستر بلوک های ۴ و ۵ کاهش یابد و نیازی به کاهش شیب بستر بقیه بلوک های توده لغزشی نیست. اگر در رابطه ۶ نیروی معرف بلوک ۴ (بلوک میانی) و در رابطه ۷ نیروی معرف بلوک ۵ (بلوک فوقانی) برابر صفر قرار داده شود، زاویه شیب پایدار برای کف بستر این دو بلوک بدست می آید (جدول ۵).

اگر زاویه شیب بستر بلوک های ۴ و ۵ کاهش نیابد، کل توده (شامل بلوک های ۱ تا ۵) ناپایدار می شود. بنابراین در مرز دره ۱ و ۲ ترک کششی بوجود می آید.

همچنین در حالیکه مقدار نیروی معرف بلوک فوقانی (بلوک ۵) برابر صفر قرار داده شود، مقدار فشار محلول حفره ای (P_{pls}) بدست می آید. با جایگزین نمودن P_{pls} در رابطه ۳ ارتفاع مجاز محلول حفره ای در توده قابل محاسبه خواهد بود (جدول ۵). مقدار ارتفاع مجاز محلول

با استفاده از پارامترهای جداول (۱) و (۲) و روابط ۲ تا ۷ نیروهای معرف بلوک های تشکیل دهنده توده لغزشی بدست می آید (جدول ۳). همچنین براساس رابطه ۱۰ و پارامترهای جدول (۲) مقدار ضریب اطمینان پایداری توده لغزشی قابل محاسبه می باشد (جدول ۴).

جدول ۳: نیروی های معرف بلوک های تشکیل دهنده توده لغزشی.

نیروی معرف	R بلوک ۱	R'_1 بلوک ۲	R'_2 بلوک ۳	R'_3 بلوک ۴	R'' بلوک ۵
مقدار	۱۱۶۴	۴۹۹۶	۲۷۷۹	-۸۴۹۶	-۱۰۲۱۹

جدول ۶: مقایسه ضریب اطمینان پایداری مقطع ۱-۱ (شکل ۸) حاصل از روش‌های جزء به جزء و روش‌های معمول تعادل حدی.

روش تحلیل پایداری	ضریب اطمینان پایداری
توده	توده
جزء به جزء	۰/۷
یانبو	۰/۷۵
مرگنسترن و پرایس	۰/۸
اسپنسر	۰/۸

نتیجه‌گیری

در این مقاله روش تحلیل پایداری جزء به جزء و کاربرد آن برای سازه‌های فروشویی توده‌ای ارائه گردید. در پایان نیز یک مثال موردی (دره ۱ سازه فروشویی ۲ مس سرچشمه) مورد بررسی قرار گرفت. مقایسه کاربرد این روش و روش‌های مرسوم تحلیل پایداری شیب‌های خاکی در یک مقطع خاص نشانه قابل قبول بودن نتیجه حاصل می‌باشد. دامنه کاربرد روش جزء به جزء در سازه‌های فروشویی توده‌ای را می‌توان به صورت زیر بیان نمود:

- ۱- تحلیل پایداری سازه و محاسبه فاکتور ایمنی لغزش توده
- ۲- تعیین بخش‌هاییکه لازم است شیب آنها کاهش یابد.
- ۳- تعیین میزان کاهش شیب بخش‌های ناپایدار
- ۴- تعیین محل ترک کششی در سازه
- ۵- تعیین ارتفاع مجاز اسید در توده

تشکر و قدردانی

در پایان، نویسندگان این مقاله بر خود لازم می‌دانند از راهنمایی‌های ارزشمند جناب آقای دکتر سعید کریمی- نسب عضو محترم هیات علمی گروه مهندسی معدن دانشکده فنی دانشگاه شهید باهنر کرمان و پرسنل پژوهشکده حمل و نقل وزارت راه و ترابری بویژه جناب آقای دکتر کیومرث عماد ریاست محترم بخش زیر ساخت‌ها، تشکر و قدردانی نمایند.

در توده برای انتخاب ضخامت زهکش شنی و قطر لوله‌های پلی اتیلنی تاثیر زیادی دارد [۱].

جدول ۵: شیب مجاز بلوک‌های ۵و۴ و ارتفاع مجاز محلول در دره ۱ توده فروشویی ۲ مس سرچشمه.

پارامتر	β_{3Saf} (Degree)	ψ_{Saf} (Degree)	H_{Saf} (m)
مقدار مجاز	۱۱	۹	۱

مقایسه نتایج روش تحلیل پایداری جزء به جزء با روش‌های تعادل حدی موجود در سازه فروشویی ۲ مس سرچشمه

همانطوریکه اشاره گردید روش‌های تعادل حدی موجود تنها ضریب اطمینان لغزش توده را ارائه می‌دهند، بنابراین مقایسه موردی روش تحلیل پایداری جزء به جزء و روش‌های تحلیل مذکور فقط از طریق مقایسه ضریب اطمینان حاصل از تحلیل امکان‌پذیر است. بدلیل پایین بودن مقاومت برشی بین آستر ژئوممبران و کوشین متراکم کف بستر توده فروشویی، محل نصب آستر ژئوممبران محل احتمالی لغزش توده می‌باشد. بنابراین سطح لغزش با چند صفحه متصل به هم همپوشانی دارد (شکل ۸). بعضی از روش‌های تعادل حدی مانند فلنیوس، فقط در مورد تجزیه و تحلیل لغزش‌های دایره‌ای کاربرد دارند و نمی‌توان از آنها برای تحلیل لغزش‌های چند صفحه‌ای استفاده نمود. روش ساتان و سیدی برای لغزش-هایی که سطح لغزش حداکثر با سه صفحه همپوشانی داشته باشد، فرموله شده‌اند. بنابراین توده لغزشی شکل (۸) تنها با استفاده از تعداد معدودی روش تعادل حدی قابل تحلیل می‌باشد. در این بخش از مقاله مقطع ۱-۱ (شکل ۸) با استفاده از روش‌های مرگنسترن و پرایس، یانبو، اسپنسر و جزء به جزء تحلیل و ضریب اطمینان حاصل با یکدیگر مقایسه شده‌اند (جدول ۶).

در این بخش از مقاله مقطع ۱-۱ (شکل ۸) با استفاده از روش‌های مرگنسترن و پرایس، یانبو، اسپنسر و جزء به جزء تحلیل و ضریب اطمینان حاصل با یکدیگر مقایسه شده‌اند (جدول ۶).

مراجع

- 1 - Majdi A., Amini Chermahini, M. and Torabi, M. (2005). "Design of drainage system improving stability of heap leaching structure(A case study in Sarcheshmeh copper mine, Iran)." *6th Ground Improvement Technique, Conference*, July 18-19.
- 2 - Thiel, and Marrk, E. S. (2003). "State of the practice review of heap leach pad design issues." *Meeting of the Geosynthetic Research Institute*, in Las Vegas, Nevada, USA.
- 3 - Breitenbach, A. J. and M. S. and P. E. (2004). "Improvement in slope stability performance of lined heap leach pads from design to operation and closure." *Published in GFR Engineering Solutions*, Vol. 22, No. 1, January/February 2004. Translation to Spanish and Portuguese provided by Vector Engineering, Inc.
- ۴ - امینی چرمهینی، م.، ترابی، م. و کریمی نسب، س. "بررسی فنی و اقتصادی امکان جایگزینی ژئوتکستایل بجای لایه کوشین در سازه فروشویی ۲ سرچشمه." پروژه مرکز تحقیقات و مطالعات مجتمع مس سرچشمه، (۱۳۸۱).
- 5 - Hunng, Y. H. (1983). *Stability Analysis of Earth Slopes*, New York.
- ۶ - امینی چرمهینی، م. "تحلیل پایداری جزءبه جزء و کاربرد آن در تحلیل و ساخت سازه های فروشویی توده ای." پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده فنی دانشگاه تهران، (۱۳۸۳).
- ۷ - نبی زاده، م. ع. و کریمی نسب، س. "تحلیل پایداری سازه فروشویی ۲ سرچشمه." پایان نامه کارشناسی ارشد تحت حمایت مرکز تحقیقات و مطالعات مجتمع مس سرچشمه، (۱۳۸۰).
- 8 - SIM Consulting Engineering Group, (1999). National Iranian Copper Industries Co., Copper Oxide Leach, Bill of Quantities.
- ۹ - آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک کرمان، "گزارش آزمون های آزمایشگاهی و محلی سازه فروشویی ۲ مس سرچشمه." (۱۳۸۰).
- ۱۰ - مهندسین مشاور ایران خاک، "گزارش آزمون های آزمایشگاهی و محلی سازه فروشویی ۱ مس سرچشمه." (۱۳۷۰).

واژه های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

- 1 - Structure Heap Leaching
- 2 - Cushion
- 3 - Pregnant Liquid Solution
- 4 - Raffinate
- 5 - Identity Force
- 6 - Toe Unit
- 7 - Middle Unit
- 8 - Upper Unit

*-کوشین ماده ای است که از ترکیب ۶۰٪ رس و ۴۰٪ ماسه بدست می آید.