

## تعیین زاویه اصطکاک داخلی سنگ‌ها به کمک سطوح برش دارای خش لغزش

محسن الیاسی

دانشگاه تهران، دانشکده علوم، گروه زمین‌شناسی

Email: Eliassi@khayam.ut.ac.ir

(دریافت: ۸۲/۵/۱؛ پذیرش: ۸۲/۹/۴)

### چکیده

با برداشت بیش از ۴۰۰ گسل دارای خش لغزش در ۲۸ محدوده عمدتاً روی توف‌های سازند کرج در بخش جنوبی البرز مرکزی متد‌های تعیین زاویه اصطکاک داخلی توده سنگ مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفت و معلوم گردید متد‌های گسل‌های مزدوج، متد  $R/\%$ ، هیستوگرام تغییرات و مقایسه موقعیت گسل با تحلیل صفحه گسل از مناسب‌ترین متد‌ها هستند بر این اساس زاویه اصطکاک داخلی توده سنگ‌های سازند کرج به طور متوسط ۳۸ درجه بدست آمد که کاملاً با توجه به ترکیب آندزیتی سنگ‌های منطقه هم‌خوانی دارد. زاویه اصطکاک داخلی کم مربوط به محدوده‌های با شکستگی‌های زیاد اولیه می‌باشد که پس از فرسایش با ارتفاع توپوگرافی کمتر و محدوده‌های با زاویه اصطکاک داخلی زیاد مرتبط با محدوده‌های با شکستگی کمتر (شبه سنگ بکر) و ارتفاع توپوگرافی بیشتر مشخص می‌شوند. بین عرض از مبدأ نموداری که بر حسب زاویه اصطکاک داخلی توده سنگ و زاویه عدم انطباق رسم می‌شود با مقدار متوسط زاویه اصطکاک داخلی توده سنگ هماهنگی چشم‌گیری دیده می‌شود.

**واژه‌های کلیدی:** زاویه اصطکاک داخلی، گسل‌های مزدوج، تحلیل صفحه گسل

### مقدمه

یکی از پارامترهای بسیار مهم در تعیین موقعیت و فعالیت گسل‌ها، زاویه اصطکاک داخلی سنگ‌ها است. معیاری که بیانگر این پارامتر روی گسل‌های قدیمی است معیار آمونتون (Amonton Criterion) می‌باشد که با رابطه زیر نمایش داده می‌شود:

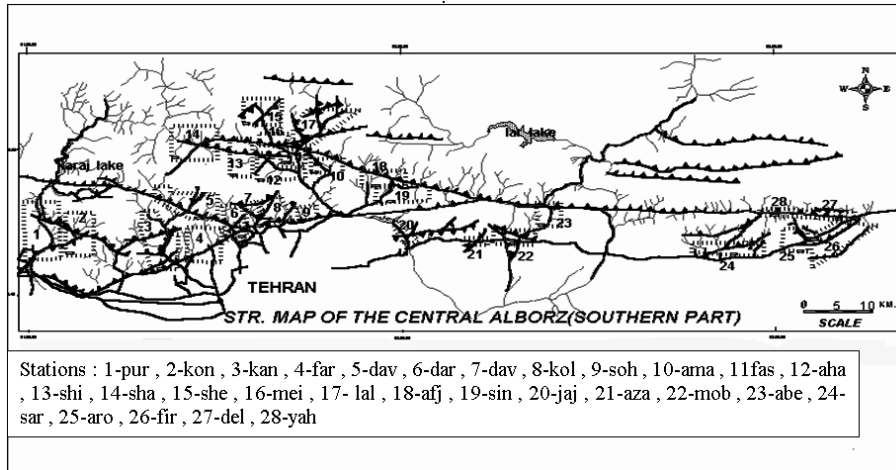
$$\tau = tg\varphi \cdot \sigma_n$$

در رابطه فوق  $\tau$  تنش برشی،  $\varphi$  زاویه اصطکاک داخلی و  $\sigma_n$  تنش نرمال می‌باشد. رابطه فوق را به خوبی می‌توان در مورد گسل‌های قدیمی به کار برد زیرا چسبندگی بعنوان عامل مقاوم وجود ندارد. در این حالت منحنی پوش مور در شکست از مبدا مختصات گذشته و شیب آن معرف زاویه اصطکاک داخلی سنگ می‌باشد. در صورتیکه سنگ برای نخستین بار شکسته شود چسبندگی بعنوان یک عامل مقاوم عمل نموده و معیار کولمب (Coulomb Criterion) رابطه تنش برشی و تنش نرمال را طبق رابطه زیر بدست می‌دهد:

$$\tau = C_0 + tg\varphi \cdot \sigma_n$$

در رابطه فوق  $C_0$  چسبندگی می‌باشد. در این حالت منحنی پوش مور در شکست بصورت خطی است که دارای عرض از مبدأ معادل چسبندگی است. رابطه فوق را می‌توان برای گسل‌هایی که برای نخستین بار سنگ بکر را شکسته‌اند به کار گرفت. به منظور تعیین زاویه اصطکاک داخلی در آزمایشگاه با صرف هزینه بسیار آزمایش سه محوری در شکست انجام و با رسم منحنی پوش مور در شکست زاویه فوق اندازه‌گیری می‌گردد. در این نوشتار سعی می‌شود با تکیه بر مبانی تحلیلی و نظری مهمترین متدهای تعیین زاویه اصطکاک داخلی بر پایه برداشت‌های صحرائی روی گسل‌های دارای خش لغزش مورد بررسی قرار گرفته و با اعمال آنها روی توف‌های ماسه‌ای سازند کرج دربخش جنوبی البرز مرکزی روشهای مذکور با یکدیگر مقایسه و نتایج اعلام گردد.

در ۲۸ ایستگاه دربخش جنوبی البرز مرکزی محدوده‌هایی انتخاب گردیدند که تا سرحد امکان توزیع گسل‌های دارای خش لغز از نظر آماری همگن باشند (نقشه ۱-).



نقشه ۱- نقشه ساختاری گسل های بخش جنوبی البرز مرکزی و ایستگاه های اندازه گیری.

### متدها

**الف - متد استفاده از گسل های مزدوج ( Conjugate Faults ):** یکی از دقیق ترین روشهای تعیین زاویه اصطکاک داخلی است. محل تلاقی این گسل ها منطبق با  $\sigma_2$  بوده که در راستای آن کشیدگی صفر می باشد. عبارت دیگر تنش اصلی متوسط روی سطح گسل عمود بر بخش لغزش واقع است. یکی از ویژگی های مهم گسل های مزدوج این است که شکل میدان تنش روی موقعیت بردار لغزش حداکثر هیچگونه تاثیری ندارد (Lisle, 1998). به عبارت دیگر در شرایط تشکیل گسل های مزدوج صفحه ای که روی آن بیشترین اختلاف تنش دیده می شود از قطب گسل و بردار لغزش نیز عبور می کند. این نکته را نیز باید خاطر نشان ساخت که تنش  $\sigma_1$  نیمساز زاویه حاده بردارهای لغزش روی اینگونه گسل ها است. اگر زاویه بردارهای لغزش روی دو گسل مزدوج را  $2\alpha$  بنامیم از رابطه زیر می توان زاویه اصطکاک داخلی سنگ را محاسبه نمود:

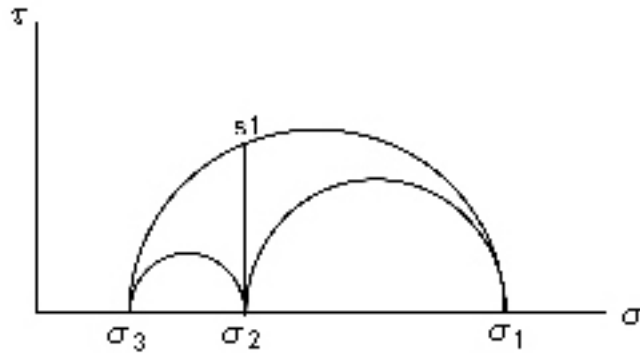
$$\varphi = \frac{\pi}{2} - 2\alpha$$

بعنوان مثال به گسل های مزدوج محدوده امامه توجه نمایید (شکل ۱). زاویه بردارهای لغزش روی دوگسل ۵۰ درجه و در نتیجه زاویه اصطکاک داخلی طبق رابطه فوق ۴۰ درجه محاسبه می شود.



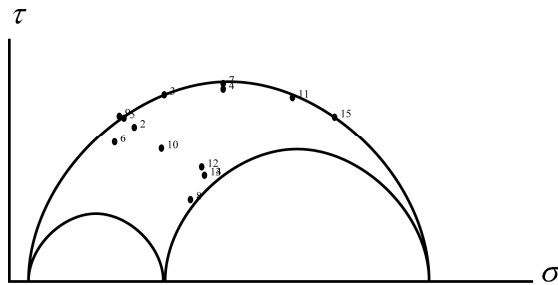
شکل ۱- گسل‌های مزدوج محدوده امامه.

در برداشت‌های صحرایی در صورتیکه فقط یکی از گسل‌های مزدوج بیرون زدگی داشته باشد، تشخیص شرایط مزدوج بودن آن آسان نیست. در اینجا روشی ارائه می‌گردد که بوسیله آن تشخیص مزدوج بودن گسل در چنین شرایطی امکان پذیر باشد. در ابتدا کلیه گسل‌هایی که در محدوده مورد نظر از نظر فعالیت تحت یک تنسور تنش فعالیت نموده برداشت و شناسایی می‌گردند (Fry, 2003) و سپس با حل تنسورهای تنش دوایر مور سه محوری بدون مقیاس رسم می‌گردد. بعنوان مثال در شکل ۲ فرض کنید دوایر مور بدست آمده حالت تنش را این چنین نشان دهد. کافی است از محل  $\sigma_2$  خط عمودی خارج تا دایره‌ای که بیشترین اختلاف تنش روی آن عمل می‌کند را قطع نماید. چنین خطی نشان‌دهنده صفحه  $\pi$  می‌باشد که از تنش اصلی متوسط نیز الزاماً عبور خواهد کرد این صفحه در واقع مکان هندسی قطب صفحاتی است که تنش نرمال روی آنها معادل تنش اصلی متوسط می‌باشد. محل تلاقی این صفحه با دایره  $\sigma_1 - \sigma_3$  نقطه‌ای مانند  $S_1$  را مشخص می‌کند که قطب یکی از صفحات مزدوج است. این نقطه قطب تنها صفحه‌ای را نشان می‌دهد که از محور  $\sigma_2$  عبور می‌نماید، لذا می‌توان آن را صفحه مزدوج در نظر گرفت. با توجه به اینکه فقط نیمه بالای دایره مور رسم گردیده براحتی می‌توان با رسم تصویر آینه‌ای آن نسبت با محور  $\sigma$  صفحه دوم مزدوج را نیز رسم نمود.



شکل ۲- دایره مور سه محوری بدون مقیاس،  $S_1$  قطب یکی از صفحات مزدوج می باشد.

این نکته را باید خاطر نشان نمود که با حل تنسور تنش با روش معکوس کردن بطور مستقیم می توان موقعیت محورهای اصلی تنش را نیز بدست آورد (الیا سی، ۱۳۸۰). حال براحتی می توان موقعیت صفحات مزدوج را بکمک استریونت تعیین نمود. بعنوان مثال در محدوده آرو (aro) داده شماره سه که دارای موقعیت (۶۴ / ۲۳۱) می باشد درست در وضعیت صفحه اصلی مزدوج بوده و بکمک آن زاویه اصطکاک داخلی روی زمین حدود ۳۰ درجه اندازه گیری شده است (شکل ۳).



شکل ۳- دایره مور سه محوری در محدوده آرو.

لازم به ذکر است در شرایط ایده آلی که منحنی پوش مور در شکست در محدوده مورد مطالعه قابل دسترس باشد با رسم عمودی از محل محور اصلی تنش متوسط به منحنی پوش مور تعیین موقعیت دقیق گسلهای مزدوج نیز امکانپذیر می شود.

ب - **متد R%**: در این متد توزیع داده‌ها بین صفر تا صد درصد توصیف می‌گردند (Wallbrecher, 1996). داده‌هایی که بطور تصادفی توزیع شده‌اند درصد نزدیک به صفر و داده‌هایی که توزیع خوشه‌ای دارند درصد نزدیک به صد را نشان می‌دهند. در این روش هرساختار خطی بعنوان یک بردار واحد تلقی می‌گردد. در یک دستگاه مختصات دکارتی  $x, y, z$  خطوط هادی  $x_i, y_i, z_i$  تعیین و از رابطه زیر قدر مطلق بردارها  $|R|$  محاسبه می‌شود:

$$|R| = \sqrt{(\sum x_i)^2 + (\sum y_i)^2 + (\sum z_i)^2}$$

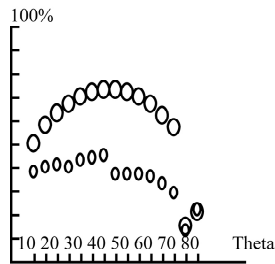
$$\frac{2|R| - n}{n} R\% = \text{رابطه زیر محاسبه نمود:}$$

در رابطه فوق  $n$  تعداد داده‌ها است.

برای محاسبه  $\phi$  بر حسب هر سطح برش دارای خش لغزش ابتدا موقعیت محورهای فشار (P)، کشش (T) و محور متوسط (B) باروش تحلیل صفحه گسل (Fault Plane Solution) تعیین می‌گردد (Angelier, 1994). ذکر این نکته نیز حایز اهمیت است که محورهای مزبور در واقع محورهای اصلی استرین پیش رونده می‌باشند (Marrett and Peacock, 1999).

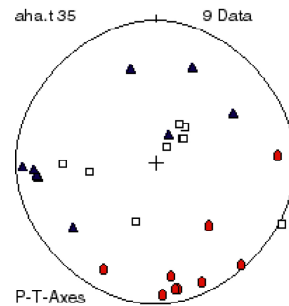
در یک دستگاه مختصات دکارتی روی محور طول‌ها زاویه اصطکاک داخلی از صفر تا هشتاد و روی محور عرض‌ها  $R\%$  مدرج می‌گردد. حال بر حسب زاویه‌های اصطکاک داخلی مختلف،  $R\%$  مربوط به محور P و T رسم می‌گردد. نقطه حداکثر نمودار مربوط به محورهای P در تیپ دگرریختی انتقال تراکمی (Transcompressional) و نقطه حداکثر مربوط به نمودار محورهای T در تیپ دگرریختی انتقال کششی (Transtensional) بهترین زاویه اصطکاک داخلی را از نظر آماری در اختیار قرار می‌دهد (Michel, 1993). اگر تیپ دگرریختی هم معلوم نباشد در حالت کلی زاویه اصطکاک داخلی مربوط به مشتق اول و یا دوم نمودارهای مربوطه خواهد بود (الیاسی، ۱۳۸۰). در اینجا به دو مثال به عنوان نمونه اشاره می‌گردد:

۱- در محدوده آهار (aha) بر اساس نه گسل دارای خش لغزش موقعیت محورهای اصلی استرین پیش‌رونده بصورت استریوگرافیک در شکل ۴-الف بنمایش درآمده است. تحلیل آماری زاویه اصطکاک داخلی روی توف‌های ماسه‌ای در این محدوده ۴۰ درجه نشان می‌دهد (شکل ۴ - ب).



Best Theta for aha = 40  
R% (P): 72.4976; R% (T): 44.5534

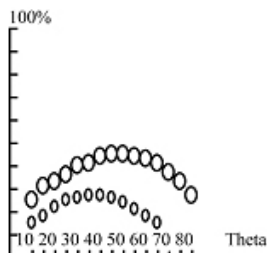
(ب)



(الف)

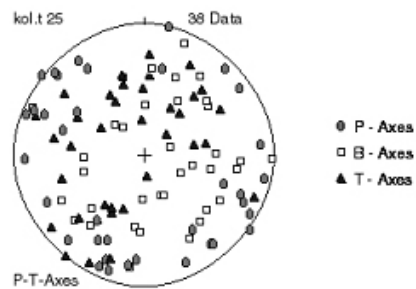
شکل ۴- تصویر استریوگرافیک محور های کینماتیک و نمودار R% محدوده آهار  
(نشانه مثلث: محور T، نشانه مربع: محور B و نشانه دایره: محور P)

۲- در محدوده کلکچال (kol) بر اساس ۳۸ گسل دارای خش لغزش موقعیت محور های اصلی استرین پیش رونده بصورت تصویر استریوگرافیک در شکل ۵- الف بنمایش درآمده است. تحلیل آماری روی محور های بدست آمده زاویه اصطکاک داخلی را روی توف های ماسه ای این محدوده ۴۰ درجه نشان میدهد (شکل ۵- ب).



Best Theta for Kol = 40  
R% (P): 43.4537; R% (T): 26.3215

(ب)



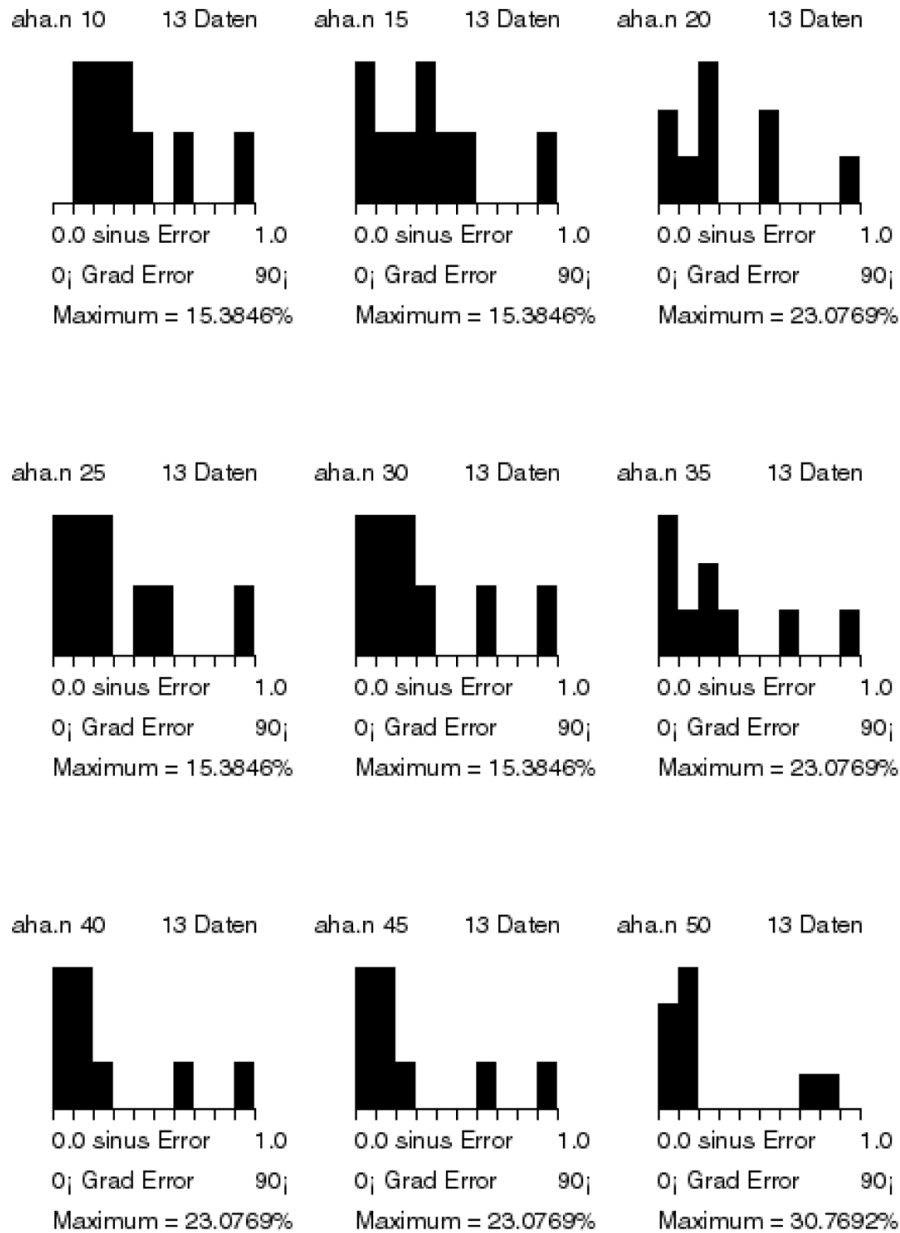
(الف)

شکل ۵- تصویر استریوگرافیک محور های کینماتیک و نمودار R% محدوده کلکچال.

ج- هیستوگرام تغییرات  $\phi$ : در این روش لازم است ابتدا زاویه عدم انطباق یعنی زاویه بین بردار لغزش اندازه گیری شده روی زمین و حداکثر تنش برشی محاسبه شده از طریق حل تنسور تنش دیرین تعیین گردد. برای محاسبه این تنسور از روش معکوس کردن بطور مستقیم روی سطوح لغزش دارای خش لغزش و یا روش جست و جوی چهار مولفه ای

(4-grid search method) استفاده شده است. روی یک دستگاه مختصات دکارتی محور طول‌ها برحسب سینوس زاویه عدم انطباق و محور عرض‌ها برحسب فرکانس رده‌های داده‌ها مدرج می‌گردد. برای مقایسه راحت‌تر در تمامی هیستوگرام‌ها مقیاس محورهای یکسان در نظر گرفته شده است. محور طول‌ها از ده تا هفتاد درجه با فواصل پنج درجه مدرج می‌گردند. زاویه اصطکاک داخلی قابل قبول مربوط به هیستوگرامی می‌شود که بزرگترین ستون آن در انتهای سمت چپ بوده و توزیع داده‌ها از منحنی گوسی با شیب زیاد تبعیت کند (Sperner, 1993).  
بعنوان نمونه به ذکر دو مثال اکتفا می‌شود:  
۱ - در محدوده آهار (aha) با تحلیل ۹ گسل دارای خش لغزش هیستوگرام تغییرات زاویه عدم انطباق در شکل ۶ به نمایش درآمده است.

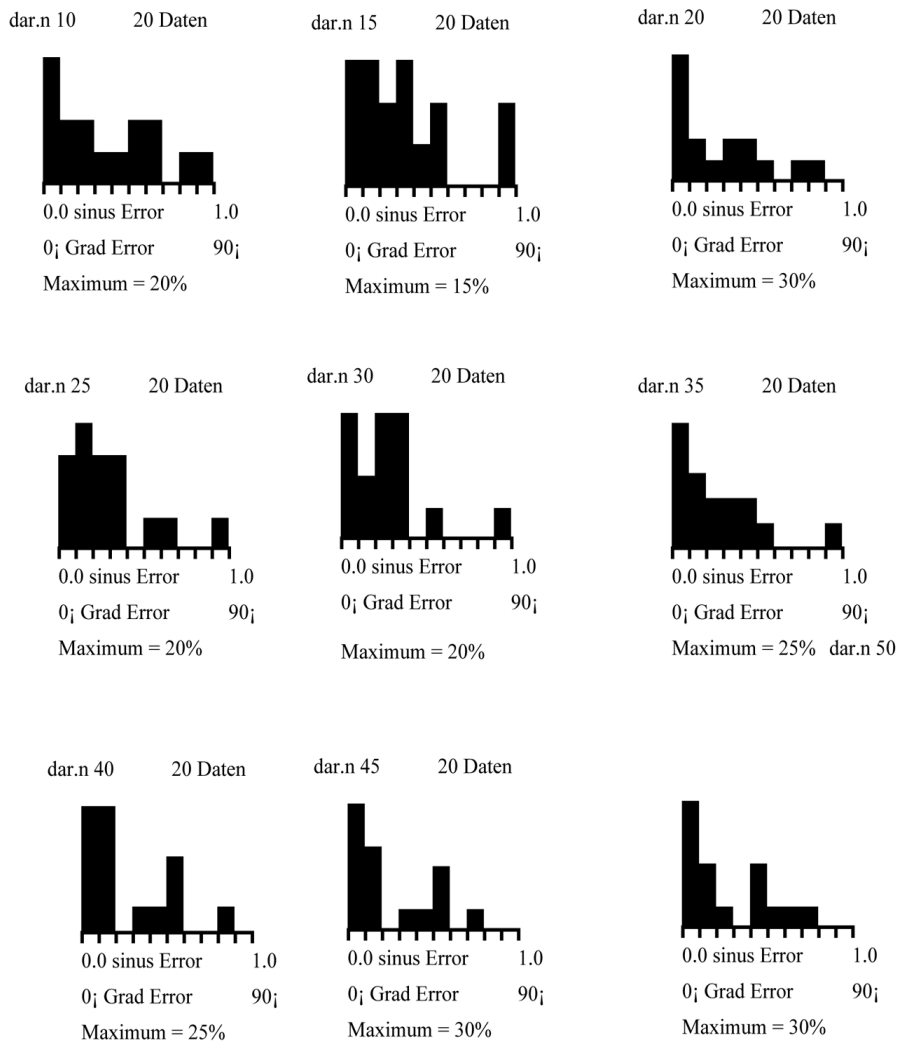




شکل ۶- هیستوگرام تغییرات زاویه عدم انطباق در محدوده آهار.

با توجه با نمودار ها زاویه اصطکاک داخلی ۳۵ درجه مناسب ترین زاویه است.

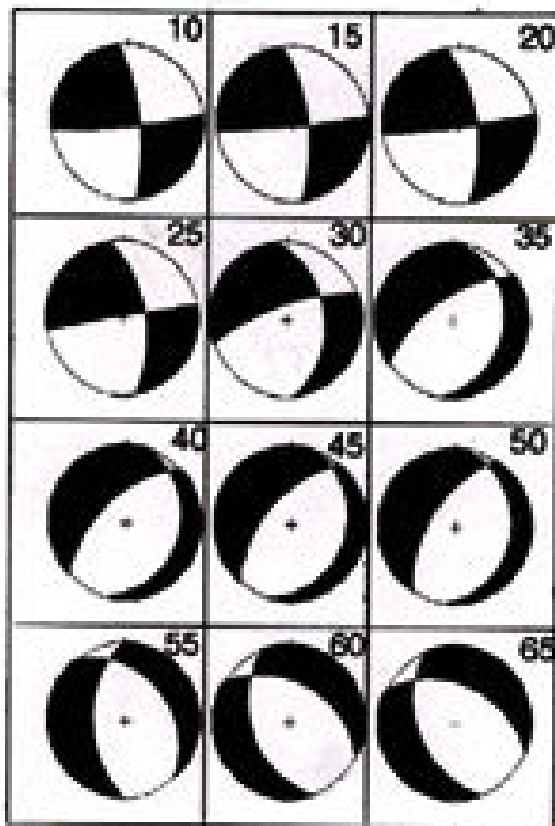
۲- در محدوده درکه (dar) با تحلیل ۵۷ گسل دارای خش لغزش هیستوگرام تغییرات زاویه عدم انطباق در شکل ۷ به نمایش درآمده است:



شکل ۷- هیستوگرام تغییرات زاویه عدم انطباق در محدوده درکه.

با توجه به نمودارها زاویه اصطکاک داخلی ۴۵ درجه مناسب ترین زاویه است.

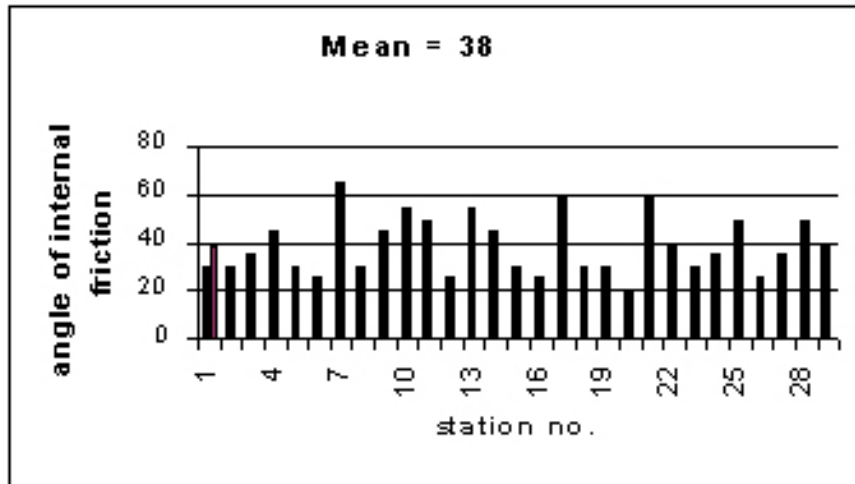
د- متد مقایسه موقعیت گسل با تحلیل صفحه گسل: این روش به ویژه زمانی بکار گرفته می شود که از یک طرف موقعیت گسلش اصلی محدوده معلوم باشد و از طرف دیگر امکان تشخیص زاویه اصطکاک داخلی سنگ به راحتی امکانپذیر نباشد. در اینصورت با اعمال زاویه های اصطکاک داخلی دلخواه موقعیت صفحه گسل را آنقدر تغییر می دهیم تا با آنچه روی زمین برداشت می شود تطابق نماید. بعنوان مثال در محدوده کن (kan) تمامی داده های پردازش شده با روش تحلیل صفحه گسل به ازای زاویه های اصطکاک داخلی ۱۰ تا ۶۵ درجه و با فاصله ۵ درجه را مورد بررسی قرار داده و سپس دو وجهی های عمود برهم بدست آمده با موقعیت واقعی گسل کن مقایسه گردید و معلوم شد زاویه اصطکاک داخلی ۳۰ درجه مناسب ترین زاویه میباشد (شکل ۸).



شکل ۸- تحلیل صفحه گسل کن با تغییر زاویه اصطکاک داخلی.

### نتیجه گیری

در این پژوهش با روش‌های گوناگون برای هر محدوده زاویه اصطکاک داخلی تعیین و نهائی شده آن برای تحلیل و مقایسه متدها در ۲۸ محدوده بکار گرفته شد. در هیستوگرام شکل ۹ طیف تغییرات زاویه اصطکاک داخلی به نمایش درآمده است.

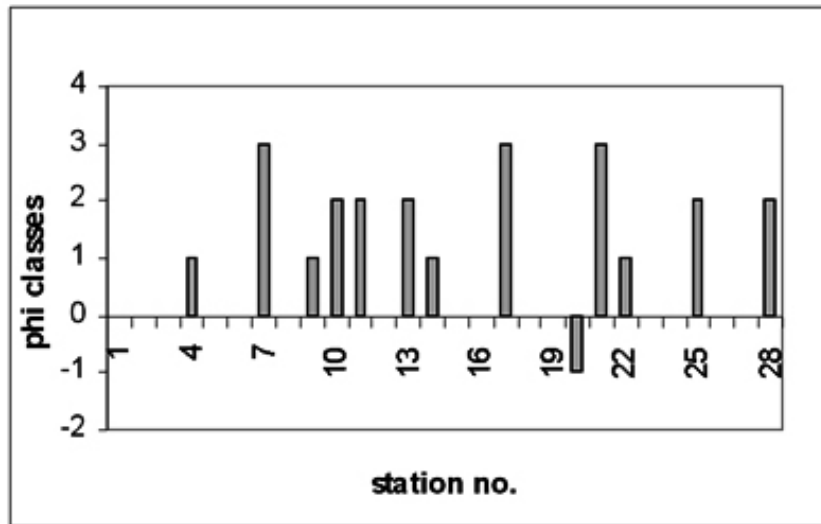


شکل-۹ نمودار تغییرات زاویه اصطکاک داخلی سنگ در بخش جنوبی البرز مرکزی (برای گویا شدن شماره ایستگاه‌ها به نقشه ۱ مراجعه شود).

نکته جالب میانگین حسابی زاویه اصطکاک داخلی توده سنگ در کل ناحیه است. که با توجه به هیستوگرام نوسانات زاویه اصطکاک داخلی ۳۸ درجه بدست می‌آید که با توجه به ترکیب آندزیتی عدد مناسبی برای کل ناحیه است.

با وجود تلاش بسیار زیادی که در برداشت داده‌ها روی سطوح برش با رفتار رئولوژیک یکسان صورت گرفت، این سوال مهم مطرح می‌شود که چرا و تحت چه شرایط زاویه اصطکاک داخلی توده سنگ دارای تغییراتی حول مقدار متوسط است. برای پاسخ به این سوال هیستوگرام نسبی تغییرات زاویه اصطکاک داخلی توده سنگ بازاها محدوده‌های مختلف رسم گردید (شکل ۱۰). برای سهولت در بحث و نتیجه‌گیری بجای آنکه زاویه مزبور بطور مستقیم بکار رود آن را نسبت به محدوده مبنا نرمالیزه و سپس رده‌بندی شده است. زاویه اصطکاک داخلی توده سنگ‌های در بخش‌های فوقانی پوسته زمین با ترکیب متوسط گرانودیوریتی معادل ۳۰ درجه در نظر گرفته

می شود (Ragan, 1985). از آنجا که ترکیب اصلی سنگهای منطقه نیز غالباً آندزیتی بوده و میانگین زاویه اصطکاک داخلی نیز با عدد مزبور قابل مقایسه است، لذا بجای عدد ۳۰ از محدوده  $30 \pm 5$  درجه بعنوان مبنا برای نرمالیزه کردن داده ها استفاده شده است. محدوده ۳۵ تا ۵۰ با عدد +۱، ۵۰ تا ۶۰ با عدد +۲ و ۶۰ به بالا با عدد +۳ و زیر ۲۵ تا ۲۰ هم با عدد -۱ رده بندی شده است.

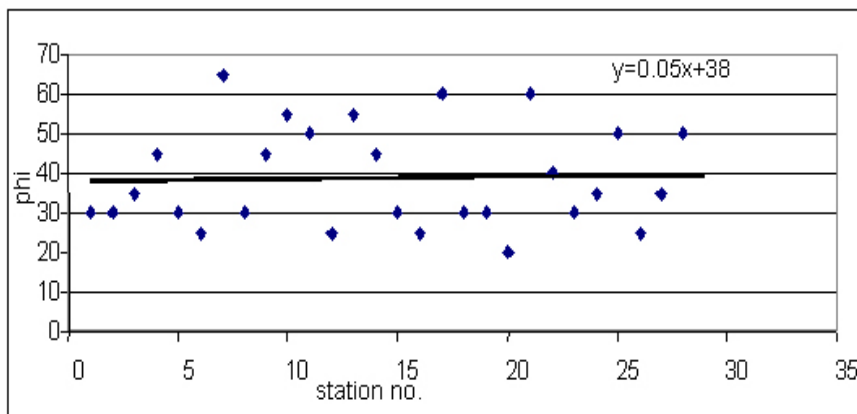


شکل ۱۰- هیستوگرام رده های زاویه اصطکاک داخلی در ۲۸ محدوده بخش جنوبی البرز مرکزی

نمودار بوضوح نشان می دهد محدوده های ۴ (امامه ama)، ۹ (دلیچای del)، ۱۴ (جاجرود jaj) و ۲۲ (سریندان sar) در رده +۱، محدوده های ۱۰ (دریند drb)، ۱۱ (فرحزاد far)، ۱۳ (راه فیروزکوه fir)، ۲۵ (شکراب shi) و ۲۸ (یهر yah) در رده +۲ و محدوده های ۷ (درکه dar)، ۱۷ (کندر kon) و ۲۱ (پورکن pur) در رده +۳ را تشکیل می دهد. فقط محدوده ۲۰ (مبارک آباد mob) در رده -۱ قرار می گیرد. از آنجا که برداشت روی سطوح برشی صورت گرفته که تا حد مقدور رفتار رئولوژیک یکسان داشته اند، لذا تنها عاملی که می تواند موجب تغییر زاویه اصطکاک داخلی توده سنگ به هنگام فعالیت سیستم گسل ها گردد حضور شکستگی های قبلی است. باین ترتیب رده +۳ از همه رده ها به سنگ بکر شبیه تر است و رده +۱ دارای شکستگی های بیشتر و نزدیکتر به متوسط پوسته زمین می باشد.

رده یک دارای درصد شکستگی‌های فراوان تری نسبت به حالت مینا می‌باشد. بالا بودن درصد شکستگی‌ها بمعنی گسترش سطوح ضعف بیشتر و فراهم آمدن شرایط مناسب تر برای نفوذ مواد ثانویه می‌باشد. احتمال دارد فعالیت نفوذی‌ها با ترکیب گابروئی در منطقه مبارک آباد ناشی از همین مسئله باشد. این نکته هم قابل ذکر است در رده‌های بالاتر که استحکام توده سنگ به سنگ بکر نزدیک‌تر است در مقابل عوامل فرسایش مقاومت بیشتری از خود نشان داده، نقاط مرتفع‌تری را بوجود می‌آورد. این امر دلیل موجه‌ای برای اوج گیری بیشتر مناطق مربوط به رده‌های دو و سه جدای از تاثیر عوامل دگرریختی مانند چین خوردگی و گسلش معکوس می‌باشد.

نکته جالب توجه دیگری که می‌بایست به آن اشاره نمود انطباق شگفت انگیز متوسط زاویه اصطکاک داخلی توده سنگ با عرض از مبدأ نموداری است که زاویه اصطکاک داخلی سنگ را بر حسب زاویه عدم انطباق نشان می‌دهد (شکل ۱۱).  
ارتباط زاویه‌ای مزبور ممکن است جنبه محلی داشته و به پژوهش بیشتری نیاز دارد.



شکل ۱۱- نمودار تغییرات زاویه اصطکاک داخلی سنگ بر حسب زاویه عدم انطباق.

**تشکر و قدر دانی :** این تحقیق در قالب طرح پژوهشی دانشکده علوم دانشگاه تهران (شماره پرونده ۶۱۳/۲/۵۱۲) صورت گرفته است که بدینوسیله از مسولین محترم ذیربط تشکر و قدردانی می‌گردد.

## References

- Angelier, J. (1994) *Fault slip analysis and paleostress reconstruction*. Continental deformation, ed. Hancock, P., Pergamon press, pp.53-100
- Fry, Norman. (2003) *Direction of resolved shear stress: a construction and discussion*, Journal of structural geology, **25**, 903-908
- Lisle, R., J. (1998) *Simple graphical constructions for the direction of shear*, Journal of structural geology, **20**, 969-973
- Marret, R., Peacock, D.C.P. (1999) *Strain and stress*, Journal of structural geology, **21**, 1057, 1063
- Ramsay, J.G., Lisle, R.J. (2000) *The techniques of modern structural geology*, Vol. 3, Academic press, session 32, pp.785-810
- Ragan, M.R. (1998) *Structural geology*, John Wiley & Sons, page 129-146
- Sperner, B., Raschbacher, L. and Ott, R. (1993) *Fault stress analysis: A turbo-pascal program package for graphical presentation and reduced stress tensor calculation*, Computer and geosciences, **19/9**, 1361-1388
- Wallbrecher, E., Feritz, H. and Unzog, W. (1996) *estimation of the shape factor of a paleostress ellipsoid by comparison with theoretical slickenline pattern and application of an eigen value method*, tectonophysics, **255**, 177-187

الیاسی، م. (۱۳۸۰)، ارزیابی تنسورهای تنش دیرین و نوع دگرریختی برپایه تحلیل خش لغزهای گسلی در دامنه جنوبی البرز مرکزی، رساله دکتری، ۲۸۰ صفحه.