

SETDISC نرم‌افزار دسته‌بندی ناپیوستگی‌ها به روش خوشه‌بندی پوآسون

ابوالفضل عبدالهی پور^{۱*}، حمید منصوری^۲

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مکانیک سنگ، بخش مهندسی معدن، دانشگاه شهید باهنر کرمان

۲- استادیار بخش مهندسی معدن، دانشگاه شهید باهنر کرمان

(دریافت ۲۹ آذر ۹۰، پذیرش اردیبهشت ۹۲)

چکیده

تعیین تعداد و خصوصیات دسته درزه‌های موجود در توده‌سنگ در هر عملیات مهندسی سنگ از اهمیت بسزایی برخوردار است. یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های ناپیوستگی‌ها، راستای آن‌ها نسبت به هم و نسبت به سازه مهندسی است. جهت تعیین تعداد دسته درزه‌ها معمولاً از روش‌های استریوگرافیک استفاده می‌شود. چنین روشی بسیار وابسته به قضاوت شخصی است و در زمان همپوشانی دسته درزه‌ها تفکیک آن‌ها را از هم مشکل می‌گرداند. در این تحقیق ابتدا الگوریتمی مبتنی بر توزیع احتمالاتی پوآسون جهت تعیین تعداد و خصوصیات دسته درزه‌ها ارائه شد؛ درزه‌هایی که با احتمالی بیش از احتمال یک رویداد تصادفی در یک محدوده تعیین‌شده از شیب و جهت شیب قرار دارند به عنوان یک دسته درزه معرفی و مقدار شیب و جهت شیب و میزان خوشه‌شوندگی (بیانگر میزان پراکندگی درزه‌ها حول مرکز خوشه) هر دسته تعیین گردید. سپس با استفاده از الگوریتم توسعه‌یافته، برنامه‌ی SETDISC به زبان Fortran 90 نوشته شد. جهت اعتبارسنجی و مقایسه نتایج حاصل از الگوریتم ارائه‌شده و همچنین برنامه SETDISC با روش‌های استریوگرافیک، ۴۲۰ ناپیوستگی برداشت‌شده با ۱۱ خط برداشت در برنامه SETDISC و نرم‌افزار Dips به صورت داده‌های ورودی وارد شدند. نتایج به دست آمده نشان داد که الگوریتم توسعه داده‌شده می‌تواند یک ابزار کمی مناسبی بدون وابستگی به قضاوت شخصی برای تعیین تعداد دسته درزه‌های موجود در سنگ و همچنین تعیین خصوصیات هر دسته درزه در اختیار کاربر قرار دهد.

کلمات کلیدی

ناپیوستگی، الگوریتم دسته‌بندی، تابع پوآسون، SETDISC

۱- مقدمه

گروه‌بندی ناپیوستگی‌ها به صورت دسته‌های مختلف و تعیین جهت‌داری میانگین آن‌ها یک جنبه مهم در مهندسی سنگ است. راستای این دسته‌ها و درجه خوشه‌شوندگی در هر دسته می‌تواند اثر مهمی بر روی خصوصیات مهندسی توده‌سنگ داشته باشد. یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های ناپیوستگی‌ها، راستای آن‌ها نسبت به هم و نسبت به سازه مهندسی است. جهت تعیین شبکه ناپیوستگی‌ها باید شیب و راستای متوسط دسته درزه‌ها مشخص شود. این داده‌ها قسمتی از ورودی‌های لازم برای مدل‌های تحلیلی، عددی یا تجربی در تحلیل پایداری توده‌سنگ، تغییر شکل سنگ، جریان سیال، قابلیت انفجار، حفر سنگ یا طراحی نگهداری را فراهم می‌آورد.

محققین، الگوریتم‌های گوناگونی بر اساس روش‌های فازی یا آماری جهت خوشه‌بندی عددی داده‌های جهت‌داری ارائه داده‌اند [۶]-[۱۱]. ون دن بوگارت^۱ و همکاران [۷] به تحلیل واریانس راستا و بردارهای جهت پرداختند. بوبک و وان لوكزبرگ^۲ [۸] روشی بر مبنای خوشه‌بندی نزدیک‌ترین همسایه جهت دسته‌بندی داده‌ها ارائه دادند.

در این مقاله با استفاده از توزیع احتمال پوآسون، الگوریتمی برای دسته‌بندی ناپیوستگی‌ها ارائه شده است و بر اساس آن نرم‌افزار SETDISC جهت تعیین تعداد دسته‌های ناپیوستگی‌ها و محاسبه میانگین جهت‌داری آن‌ها به همراه درصد خوشه‌شوندگی آن‌ها توسعه داده شد.

۲- معایب روش‌های استریوگرافیک (بصری) در دسته‌بندی درزه‌ها

یکی از ساده‌ترین شکل‌های نمایش تصویری داده‌های جهت‌داری، استفاده از نمودار گل سرخی است. این روش بیشتر در جایی که شیب ناپیوستگی‌ها بیش از حدود ۶۰° باشد مناسب است [۸]. در این موارد جهت شیب از اهمیت بالایی برخوردار است و بر روی یک هیستوگرام دایروی در بازه‌های ۵، ۱۰ یا ۱۵ درجه‌ای بر اساس تعداد داده‌ها رسم می‌شوند. نتایج توسط گوه‌های شعاعی به نسبت تعداد رخداد در هر بازه رسم می‌شوند. این رخداد به عنوان یک عدد خام، نسبت یا درصدی از کل داده‌ها ارائه می‌شود. از عیوب نمودار گل سرخی، ارائه ندادن اطلاعات از شیب ناپیوستگی‌ها است [۸].

مشکلات نمایش سه بعدی داده‌های ناپیوستگی در دو بعد بر روی صفحه کاغذ توسط روش استریوگرافیک یا تصویر نیمکره‌ای برطرف می‌شود. راستای یک خط در فضای سه بعدی به صورت یکتا توسط یک نقطه در یک سطح دایروی به شعاع R بیان می‌شود. خوشه‌ها یا دسته‌های اصلی به صورت چشمی تشخیص داده می‌شوند. محدوده‌ی هر دسته توسط مقدار زوایای شیب و جهت شیب تعیین می‌شود. بدین صورت که اختلاف زاویه‌ای شیب و جهت شیب هر یک از اعضا با مرکز خوشه باید کمتر از یک مقدار از پیش تعریف شده باشد. مزیت این روش امکان استفاده از نظر کارشناسی فرد آشنا با منطقه در تشخیص خوشه‌هاست. عیب این روش در وابستگی به قضاوت شخصی است و بنابراین نسبت به خطای (آرپی^۳) فردی به خصوص وقتی که فاکتورهای وزن‌دهی لحاظ شده‌اند، حساس است. خوشه‌بندی بصری در زمان همپوشانی خوشه‌ها نیز می‌تواند بسیار مشکل‌ساز باشد [۸]. از این رو استفاده از یک روش ریاضی می‌تواند مفید باشد. همان‌طور که اشاره شد نیاز به وجود شخصی باتجربه کافی از منطقه در روش تشخیص چشمی دسته درزه‌ها ضروری می‌نماید. در روش پیشنهادی قضاوت‌های شخصی و تجربه فردی تأثیری نخواهد داشت اگرچه قضاوت مهندسی همچنان از جایگاه بالایی برخوردار است اما در دسترس نبودن تجربه کافی از یک‌سو و اختلاف نظر کارشناسان نیز در دسته‌بندی، به خصوص در زمان همپوشانی داده‌ها، از سوی دیگر نیاز به روشی مستقل از این قضاوت‌ها را ضروری می‌داند. از مزیت‌های چنین روشی حصول نتایج مشابه توسط تمام کاربران در هر زمان و مکان است؛ مشکلات ایجادشده در همپوشانی داده‌ها نیز به صورت یکسان در تمام موارد بر طرف خواهد شد و راستای متوسط دسته درزه‌ها به طور دقیق مشخص خواهد شد.

۳- تحلیل داده‌های جهت‌داری توسط توزیع احتمال پوآسون

یک روش که در آن ارزیابی شخصی کمتر دخالت دارد برای تحلیل خوشه‌ها در داده‌های جهت‌داری توسط شانی و مهتاب^۴ و سپس مهتاب و یگولالپ^۵ ارائه شد [۱۱]-[۴]. الگوریتم خوشه‌بندی بر اساس این فرض است که یک دسته ناپیوستگی درجه خوشه‌شوندگی بسیار بالاتری نسبت به یک توزیع تصادفی دارد. مطالعات فراوان توسط محققین نشان داده است که احتمال رخداد تصادفی ناپیوستگی‌ها می‌تواند به خوبی توسط توزیع پوآسون بیان شود [۱۱]-[۹].

$$\cos \delta = |\cos(\alpha_n - \alpha_s) \cos \beta_n \cos \beta_s + \sin \beta_n \sin \beta_s|$$

این مخروط حول تمامی قطبها تشکیل می شود و تعداد قطبهایی که با مرکز مخروط زاویه ای کوچکتر از ψ می سازند به دست می دهد. قطبی که به اندازه ی t_{crit} یا بیش از آن قطب ناپیوستگی در مخروط جستجوی خود قرار دهد در زاویه ی ψ چگال خوانده می شود.

قطبهای درون هر مخروط به منظور خنثی کردن آریبی خط برداشت توسط مقادیر وزن دهی شده خویش شمارش می شوند. استفاده از مقادیر وزن دهی شده این امکان را فراهم می آورد تا به جای استفاده از یک مقدار صحیح، مقداری حقیقی برای t_{crit} در نظر گرفته شود.

اگر در توزیع کاملاً تصادفی ناپیوستگی ها، یک قطب ناپیوستگی، درون تعداد مخروط جستجوهای، بیش از مقدار قابل انتظار قرار گیرد آن ناپیوستگی چگال در نظر گرفته می شود. هر جفت ناپیوستگی چگال بررسی می شوند و اگر زاویه بین آن دو کمتر از ψ باشد، آن دو در یک خوشه قرار می گیرند. در بسیاری از موارد ممکن است که یک ناپیوستگی متعلق به بیش از یک خوشه باشد، این عمل همپوشانی نامیده می شود. برای حل این مشکل طبق الگوی زیر عمل می شود.

۱- ابتدا تمام گروه های چگال ممکن بدون در نظر گرفتن همپوشانی ایجاد می شوند بزرگترین گروه به عنوان اولین خوشه بهینه انتخاب می شود.

۲- اعضای این خوشه از دیگر گروه های چگال در صورت وجود کم می شوند (برخی گروه ها، دیگر چگال نخواهند بود و حذف می شوند، بعضی دیگر چند عضو از دست می دهند و بعضی دیگر هیچ تغییری نمی کنند)

۳- در گروه های جدید چرخه از قدم ۱ دوباره اجرا می شود.

این کار تا به پایان رسیدن گروه های چگال ادامه می یابد، در انتها خوشه هایی تشکیل می شود که هیچ گونه همپوشانی باهم ندارند.

۴- خطای نمونه گیری جهت داری

یکی از اولین کسانی که به تحلیل خطای جهت داری پرداخت، ترزاقی^۵ بود. او از فاکتور تصحیح هندسی بر اساس زاویه بین خط برداشت و قطب ناپیوستگی ها استفاده کرد.

$$P(t, v) = \frac{e^{-\lambda v} (\lambda v)^t}{t!} \quad (1)$$

که در آن t یک عدد و λ فراوانی رخداد در واحد بعد (زمان، فاصله، زاویه و...) است. در اینجا v محدوده راستاهای قطب ناپیوستگی هاست. این محدوده می تواند توسط زاویه مخروط ψ حول محوری با امتداد و شیب α_a/β_a مشخص شود. این زاویه مخروط شامل یک نسبت c از کل راستاهای به طور یکسان پراکنده در نیمکره است:

$$c = 1 - \cos \psi \quad (2)$$

اگر فضای نمونه تمام راستاها در نیمکره دارای اندازه واحد باشد، آنگاه $c = v$. برای اندازه نمونه کل، شامل n قطب، ناپیوستگی فراوانی رخداد λ با n برابر خواهد بود. با جایگذاری v و λ در رابطه ۱ رابطه ۳ به دست می آید.

$$P(t, v) = \frac{e^{-nc} (nc)^t}{t!} \quad (3)$$

که c از رابطه ۲ به دست می آید. رابطه ۳ احتمال وجود دقیقاً t قطب ناپیوستگی درون زاویه ψ از یک محور مشخص میان n قطب به صورت تصادفی توزیع شده را نشان می دهد. احتمال $P(>t, c)$ وقوع بیش از t قطب به صورت تصادفی توزیع شده در زاویه مخروط ψ توسط مجموع زیر بیان می شود

$$P(>t, c) = 1 - \sum_{j=0}^t \frac{e^{-nc} (nc)^j}{j!} \quad (4)$$

که در آن مانند قبل c ، از رابطه ۲ به دست می آید و j یک عدد اشاره گر است.

برای مقادیر معلوم n و c ، با افزایش t احتمال $P(>t, c)$ کاهش می یابد. برای تحلیل داده های جهت داری مهتاب و یگولالپ یک مقدار بحرانی t به عنوان فراوانی بحرانی t_{crit} مشخص کردند و آن را به عنوان کوچکترین مقدار t برای اینکه $P(>t, c) \leq s$ تعریف کردند که در آن s احتمال حدی است. شانلی و مهتاب s را برابر 0.05 در نظر گرفتند [۱]. مهتاب و یگولالپ با قرار دادن $s=c$ الگوریتم نسبتاً بهتری ارائه دادند [۴].

یک زاویه ψ مناسب انتخاب می شود و مخروط جستجو حول اولین قطب ناپیوستگی داده ها با استفاده از رابطه ۵ تشکیل می شود.

$$(5)$$

۵- جهت یافتگی متوسط خوشه‌ها

مؤلفه‌های کارترین قطب با امتداد α_n و شیب β_n از رابطه (۹) به دست می‌آید. جهت تعیین راستای متوسط هر خوشه ابتدا مؤلفه‌های کارترین اعضا آن محاسبه می‌شوند.

$$\begin{aligned} n_x &= \cos \alpha_n \cos \beta_n \\ n_y &= \sin \alpha_n \cos \beta_n \\ n_z &= \sin \beta_n \end{aligned} \quad (9)$$

مؤلفه‌های بردار برآیند خوشه‌ای که M عضو دارد از رابطه (۱۰) به دست می‌آید.

که δ زاویه حاده بین قطب ناپیوستگی و خط برداشت است.

$$r_{xn} = \sum_{i=1}^M n_{xi}, r_{yn} = \sum_{i=1}^M n_{yi}, r_{zn} = \sum_{i=1}^M n_{zi} \quad (10)$$

و بردار برآیند از رابطه (۱۱) محاسبه می‌شود:

$$R = \sqrt{(n_x)^2 + (n_y)^2 + (n_z)^2} \quad (11)$$

بزرگی بردار برآیند معیاری برای تشخیص درجه خوشه‌بندی ارائه می‌دهد. نسبت بردار برآیند نزدیک به ۱/۰ بدان معناست که قطب ناپیوستگی‌ها، متمرکز و نزدیک به مرکز خوشه هستند، هرچه مقادیر از ۱/۰ کوچک‌تر باشند بیان‌کننده پراکندگی بیشتر اعضای آن خوشه است. بر همین اساس از فاکتور خوشه‌شوندگی جهت تعیین میزان تمرکز خوشه‌ها مطابق رابطه (۱۱) استفاده شد.

$$C.F = \frac{|R|}{M} \quad (12)$$

که در آن $|R|$ بزرگی بردار برآیند و M تعداد اعضا خوشه است. امتداد و شیب بردار برآیند خوشه از رابطه (۱۳) و (۱۴) به دست می‌آید.

$$\alpha = \arctan\left(\frac{n_y}{n_x}\right) + Q \quad (13)$$

$$\beta = \arctan\left(\frac{n_z}{\sqrt{(n_x)^2 + (n_y)^2}}\right) \quad (14)$$

که مقدار Q از جدول (۱) به دست می‌آید. پارامتر Q یک زاویه در مقیاس درجه است که از قرار گرفتن α در ربع صحیح و بین 0° تا 360° اطمینان حاصل می‌کند.

محققین دیگری نیز بعد از او این موضوع را بررسی کردند [۱۴]-[۱۲] و اتاگالا^۹ خطای نمونه‌گیری را با استفاده از روش برداری تصحیح نمود [۱۵].

یک صفحه ناپیوستگی با امتداد α_n ، شیب β_n و مساحت سطح A فرض می‌شود. احتمال P_s ، که یک خط برداشت با امتداد α_s و شیب β_s به صورت تصادفی یک ناپیوستگی را قطع کند و در نتیجه آن را برداشت نماید مستقیماً وابسته به سطح A_s ناپیوستگی تصویر شده بر صفحه نرمال بر راستای خط برداشت است. بنابراین:

$$P_s \propto A_s, A_s = A \cos \delta \quad (6)$$

بنابراین

$$P_s \propto A \cos \delta$$

زاویه δ می‌تواند به صورت استریوگرافیکی و یا با روش جبر برداری با استفاده از رابطه ۵ به دست آید.

این رابطه همیشه کوچک‌ترین زاویه δ را محاسبه می‌کند. حداکثر احتمال برداشت هر ناپیوستگی توسط یک خط برداشت (P_{sm}) وقتی است که $\delta = 0$ است و حداقل مقدار احتمال برداشت (معادل صفر) وقتی است که $\delta = 90^\circ$ باشد. بنابراین خط برداشت تمایل کمتری برای برداشت ناپیوستگی‌هایی که زاویه δ بزرگ‌تری دارند، نشان می‌دهد. این کاهش نسبی توسط نسبت زیر نشان داده می‌شود.

$$\frac{P_s}{P_{sm}} = \cos \delta \quad (7)$$

می‌توان این کاهش اندازه برداشت در مقادیر بالاتر δ را با دادن وزن بالاتری به ناپیوستگی‌های برداشت‌شده جبران کرد. یک ناپیوستگی با امتداد α_n و شیب β_n برداشت‌شده با خط برداشت با امتداد α_s و شیب β_s دارای وزن w خواهد بود.

$$w = \frac{1}{\cos \delta} \quad \delta < 90^\circ \quad (8)$$

که $\cos \delta$ از رابطه (۷) به دست می‌آید. این وزن‌دهی، خطای ایجادشده توسط خط برداشت را کاهش می‌دهد. وقتی δ به 90° نزدیک می‌شود، w به قدری بزرگ می‌شود که یک ناپیوستگی می‌تواند الگوی توزیع را تحت تأثیر خود قرار دهد. جهت اجتناب از این موضوع، مقدار حداکثر مجاز ۱۰ برای وزن‌ها در نظر گرفته می‌شود.

جدول ۱: مقادیر پارامتر Q در رابطه ۱۲

n_x	n_y	Q
≥ 0	≥ 0	0°
< 0	≥ 0	180°
< 0	< 0	180°
≥ 0	< 0	360°

زاویه مخروط 20° و احتمال حدی ۵٪ (با در نظر گرفتن وزن ها جهت حذف خطا) داده ها در SETDISC مورد پردازش قرار گرفتند. حاصل این تحلیل، تشخیص دو دسته ناپیوستگی است (شکل ۲، نمایش استریوگرافیک تمام داده ها در Dips).

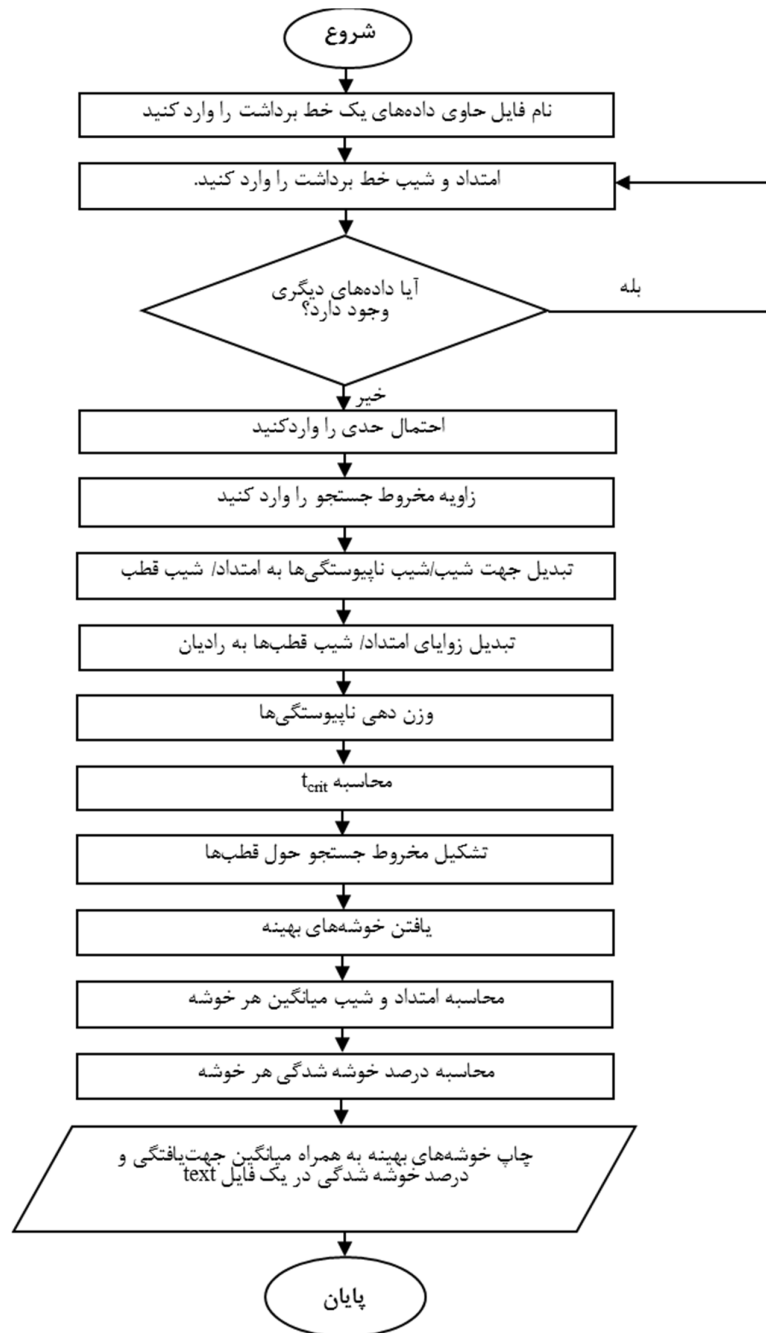
در ادامه برای اطمینان از صحت محاسبات انجام شده توسط نرم افزار برای محاسبه جهت داری میانگین هر دسته درزه، خوشه های تشخیص داده شده توسط نرم افزار SETDISC به صورت جداگانه وارد Dips شدند. شکل ۳ روند و زاویه میل قطب متوسط این دسته درزه ها را در Dips نشان می دهد خصوصیات خوشه های یافت شده در SETDISC و Dips در جدول ۲ نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود شیب و جهت شیب حاصل از نرم افزارهای SETDISC و Dips مطابقت دارند، علاوه بر این SETDISC میزان خوشه شوندگی و تعداد اعضای هر خوشه را نیز مشخص می کند. با الگوریتم پیشنهادی و برنامه ارائه شده مشکلات تشخیص دسته درزه ها و خصوصیات متوسط دسته درزه ها به خوبی بر طرف شده و اطلاعات مورد نیاز با دقت مناسب و به صورت یکتا به دست می آید. خطوط تراز مربوط به هر دسته درزه به صورت جداگانه که توسط نرم افزار Dips تهیه شده است در شکل ۴ نشان داده شده اند.

۶- الگوریتم مورد استفاده برای دسته بندی و ایجاد SETDISC نرم افزار

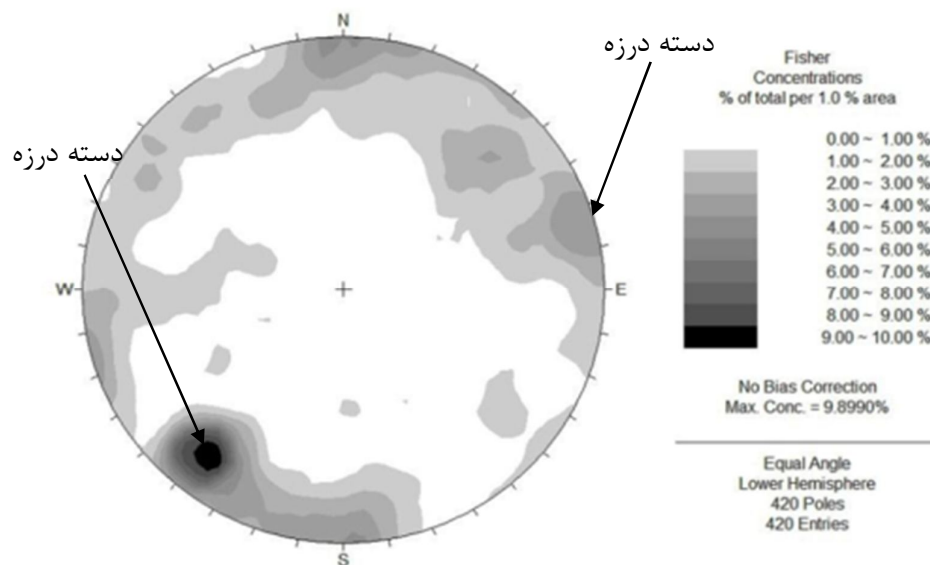
با توجه به آنچه که در قسمت های قبل گفته شد، الگوریتمی جهت تعیین خوشه ها ساخته شد. فلوچارت این الگوریتم در شکل ۱ دیده می شود. این الگوریتم جهت ساخت یک نرم افزار قادر به دسته بندی ناپیوستگی ها استفاده شد. برنامه نویسی این نرم افزار با استفاده از زبان برنامه نویسی Fortran 90 صورت گرفته است. Fortran 90 برای انجام محاسبات ریاضی با سرعت و قابلیت بالا طراحی شده است. قدرت پردازش بالای این زبان در حل سریع مسائل بسیار مفید خواهد بود. نرم افزار طراحی شده SETDISC نام گذاری شده است. SETDISC به صورت دستوری عمل می کند. داده ها، شامل اطلاعات شیب و جهت شیب ناپیوستگی ها به صورت یک فایل متنی در قالب "Text" در نرم افزار فراخوانی می شوند سپس امتداد و شیب خط برداشت ناپیوستگی ها دریافت می شود. یک احتمال حدی توسط کاربر تعیین می گردد پس از آن یک زاویه برای مخروط جستجو انتخاب می شود؛ سپس ورودی ها با استفاده از ساختار نشان داده شده در شکل ۱ مورد دسته بندی قرار می گیرند. نتایج نهایی، شامل ناپیوستگی های قرار گرفته در هر دسته، خصوصیات متوسط هر دسته و غیره در یک فایل متنی ذخیره شده و به کاربر ارائه می گردد.

۷- اعتبارسنجی الگوریتم

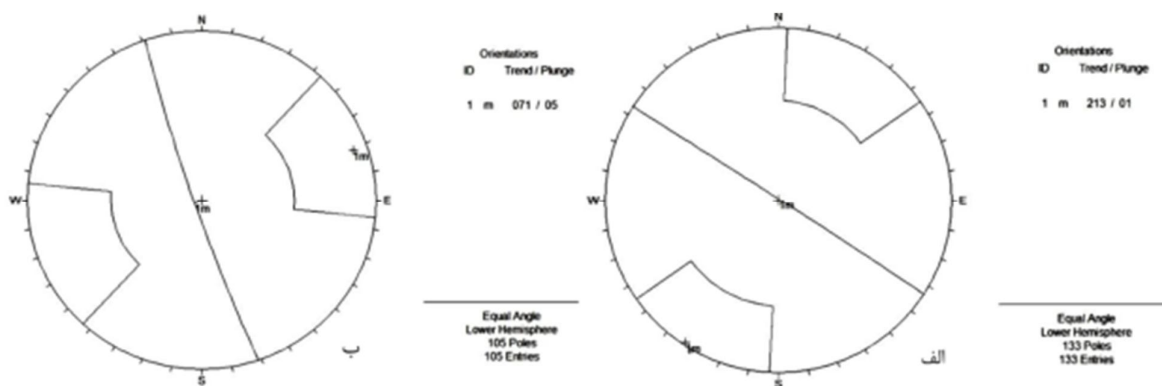
جهت اعتبارسنجی نرم افزار ارائه شده، از اطلاعات شیب و جهت شیب ۴۲۰ ناپیوستگی برداشت شده توسط ۱۱ خط برداشت استفاده شده است. شکل ۲، نمایش استریوگرافیک تمام داده ها و خطوط تراز حاصل از این ناپیوستگی ها در نرم افزار Dips است، همان طور که مشاهده می شود تشخیص دسته درزه ها به دلیل همپوشانی خطوط تراز و پراکندگی ناپیوستگی ها به صورت چشمی مشکل است. با در نظر گرفتن



شکل ۱: ساختار استفاده شده در ساخت برنامه SETDISC



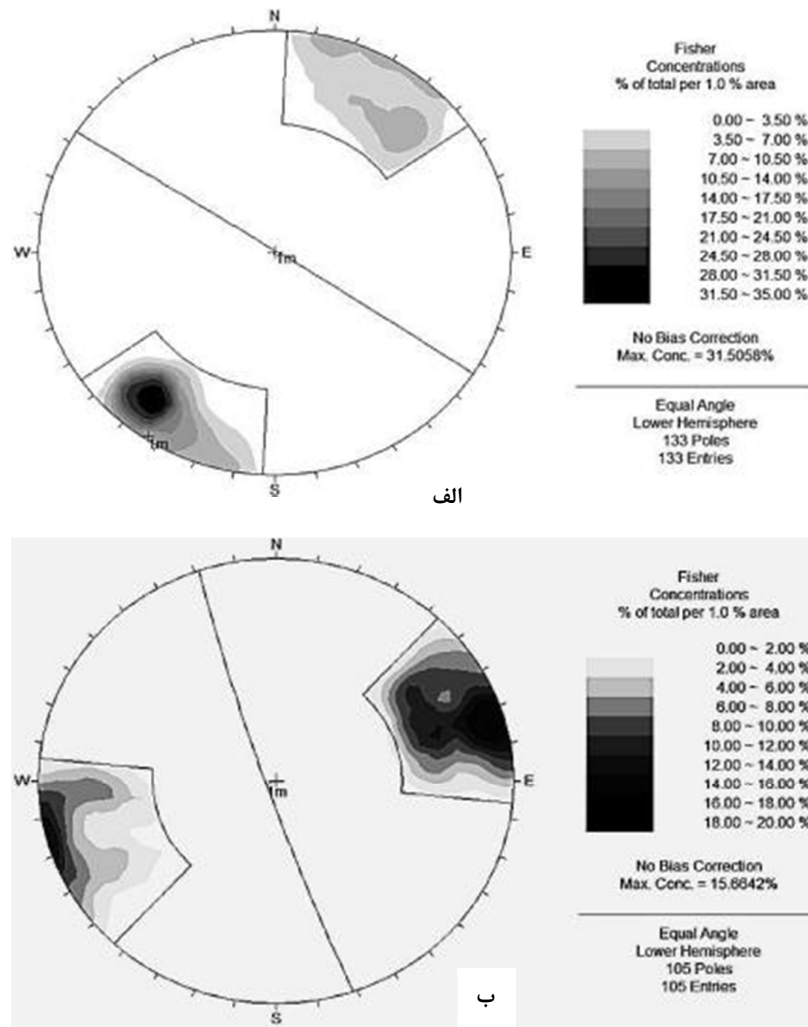
شکل ۲: نمایش استریوگرافیک تمام داده ها در Dips



شکل ۳: روند و زاویه میل: الف-دسته درزه اول و ب-دسته درزه دوم

جدول ۲: نتیجه تحلیل داده ها توسط SETDISC و Dips

نرم افزار	تعداد اعضا	جهت شیب	شیب	میزان خوشه شدگی	
SETDISC	۱۰۵	۴۰/۹	۶۸/۱	۰/۴۸۶۹	خوشه اول
Dips	۱۰۵	۳۷	۷۹	-	
SETDISC	۱۳۳	۲۰۹/۷°	۵۷/۲	۰/۳۰۲۹	خوشه دوم
Dips	۱۳۳	۲۴۶	۷۹	-	



شکل ۴: خطوط تراز دو دسته درزه به صورت جداگانه (الف) خوشه اول (ب) خوشه دوم

۸- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، الگوریتمی جهت تعیین دسته درزه‌ها و راستای متوسط آن‌ها بر اساس توزیع احتمالاتی پواسون ارائه شد. سپس بر اساس این الگوریتم، نرم‌افزار SETDISC ایجاد گردید. نتایج حاصل از تحلیل توسط این نرم‌افزار با نتایج حاصل از نرم‌افزار Dips مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج نشان دادند که تعیین میزان خوشه‌شوندگی ناپیوستگی‌ها و دسته‌بندی آن‌ها با الگوریتم و برنامه پیشنهادی ساده‌تر و سریع‌تر از نرم‌افزار Dips است. همچنین مشخصات دسته‌های تشخیص داده‌شده با دقت خوبی قابل محاسبه است و قضاوت شخصی در نتایج حاصل از نرم‌افزار SETDISC دخیل نیست. این قابلیت باعث می‌شود که SETDISC بتواند به عنوان برنامه‌ای ساده جهت به دست آوردن خصوصیات دسته‌های

ناپیوستگی در یک منطقه بدون نیاز به داشتن تجربه زیاد کاربر مورد استفاده قرار گیرد. از مهم‌ترین استفاده‌های نرم‌افزار تشخیص دسته درزه‌ها در شرایط پیچیده و پراکندگی بالای ناپیوستگی‌هاست.

۹- مراجع

- [1] Shanley R. J., Mahtab M. A., 1976, *Delineation and Analysis of Clusters in Orientation Data*. Mathematical Geology, Vol 8, No.
- [2] Einstein H. H., Baecher G. B., Veneziano D., 1979, *Risk Analysis for Rock Slopes in Open Pit Mines*. Parts I-V, USBM Technical Report J0275015.
- [3] Miller S. M., 1983, *A statistical method to evaluate homogeneity of structural populations*. Mathematical Geology. 15, 317-328.
- [4] Mahtab M. A. and Yegulalp T. M., 1984, *A similarity test for grouping orientation data in rock*

- [12] Baecher G. N. and Lanney N. A., 1978, *Trace length biases in joint surveys*. Proc. 19th U.S. Syrup. on Rock Mech., 1, 56-65.
- [13] Kulatilake P. H. S. W. and Wu T. H., 1984a, *Sampling bias on orientation of discontinuities*. Rock Mech. and Rock Engng., 17, 277-289
- [14] Priest S. D., 1985, *Hemispherical projection Methods in Rock Mechanics*, George Allen and Unwin, London.
- [15] Wathugala D. N., Kulatilake P. H. S. W., Wathugala G. W. and Stephansson O., 1990, *A general procedure to correct sampling bias on joint orientation using a vector approach*. Computers and Geomech., 1 O, 1-31. 243-253.
- [5] Harris, J. P., 1992, *Fuzzy objective functions applied to the analysis of discontinuity orientation data*. ISRM Symp.: Eurock '92, Rock Characterization, Chester, UK, Ed: J. A., Hudson, 25-30.
- [6] Kulatilake P. H. S. W., 1993, *Application of probability and statistics in joint network modeling in three dimensions*. Proc. Conf. on Probabilistic Methods in Geotech. Engrg., Lanberrra, Australia, 63-87.
- [7] Van den Boogaart K., G., et al., 2004, *Analysis of variance for directions and axes*. Mathematics and Computer Sciences in Geology, 6, 368-381
- [8] Bubeck S., Von Luxburg, U., 2009, *Nearest neighbor clustering: a baseline method for consistent clustering with arbitrary objective functions*. Journal of Machine Learning Research 10, 657-698
- [9] Mahtab M. A. and Yegulalp T. M., 1984, *A rejection criterion for definition of clusters in orientation data*. In Issues in Rock Mech. Proc. of 22nd symposium on Rock Mech, Berkeley, R. E. Goodman and F. E. Heuze (eds), American institute of Mining Metallurgy and Petroleum. Engineers, New York, 116-123.
- [10] Priest S.D., 1993, *Discontinuity analysis for rock engineering*. CHAPMAN & HALL. London
- [11] Terzaghi R., 1965, *Sources of error in joint surveys*. Geotechnique, London, UK, 5, 287-304.

-
1. Van den Boogaart
 2. Bubeck and Von Luxburg
 3. Bias
 4. Shanley and Mahtab
 5. Mahtab and Yegulalp
 6. Terzaghi
 7. Wathugala