# برآورد توزیع حجم بلوک‌های سنگی تشکیل شده در روش المان مجزا با استفاده از شاخص مقاومت زمین‌شناسی (GSI)

جواد توکلی، محمود بهنیا*، مسعود چراغی سیف‌آباد؛
دانشگاه صنعتی اصفهان، دانشکدهٔ مهندسی معدن

تاریخ: دریافت ۹۵/۰۴/۲۱ پذیرش ۹۶/۰۴/۲۶

## چکیده

در مدل‌سازی عددی با استفاده از روش المان مجزا، چگونگی ایجاد ناپیوستگی‌ها در مدل تأثیر زیادی بر نتایج نهایی مدل‌سازی دارد. در نرم‌افزار3DEC امکان ایجاد دسته درزه‌ها به چهار حالت منظم و مداوم، منظم و غیرمداوم، نامنظم و مداوم و نامنظم و غیرمداوم وجود دارد. از طرفی به‌دلیل تأثیر عمدهٔ ابعاد بلوک‌ها بر رفتار تودهٔ سنگ و پارامترهای مقاومتی و تغییرشکل‌پذیری آن، این‌که از چهار حالت موجود کدام مناسب‌تر است و بیان‌کنندهٔ شرایط واقعی تودهٔ سنگ است نکتهٔ مهمی است که باید به آن توجه شود. در این پژوهش از دیدگاه کمی موجود برای محاسبهٔ شاخص مقاومت زمین‌شناسی (GSI) که کای و همکاران ارائه کرده‌اند و در آن ابعاد بلوک‌ها به‌عنوان پارامتری اثرگذار مورد نیاز است به‌منظور تعیین مناسب‌ترین حالت برای ایجاد درزه‌ها در مدل عددی بهره گرفته شده است. در همین راستا با استفاده از مشخصات سیستم ناپیوستگی‌های تکیه‌گاه چپ سد بختیاری و طبقه‌بندی GSI تودهٔ سنگ این ناحیه، مناسب‌ترین روش ایجاد دسته درزه‌ها در یک مدل عددی با توجه به فاصله‌داری و تداوم آن‌ها به‌گونه‌ای که ابعاد بلوک‌های تولید شده تطابق زیادی با ابعاد بلوک‌ها در واقعیت داشته باشد پیشنهاد شده است.

**واژه‌های کلیدی:** روش المان مجزا، نرم افزار3DEC، ابعاد بلوک‌ها، GSI، تداوم درزه‌ها

***نویسنده مسئول** behnia@cc.iut.ac.ir

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.2.2.8 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.2.259 ]

## مقدمه

در روش المان مجزا که جزء روش‌های محیط ناپیوسته است، تودهٔ سنگ به‌صورت مجموعه‌ای از بلوک‌های مجزا در نظر گرفته شده به‌طوری‌که درزه‌ها به‌عنوان فصل مشترک دو جسم جدا تعریف می‌شود. دراین روش محاسبات با به‌کارگیری متناوب قانون نیرو- جابه‌جایی در همهٔ سطوح تماس و قانون دوم نیوتن برای همهٔ بلوک‌ها انجام می‌گیرد. با استفاده از قانون نیرو- جابه‌جایی نیروهای تماسی ناشی از یک جابه‌جایی مشخص، محاسبه شده و با استفاده از قانون دوم نیوتن می‌توان حرکت بلوک‌ها در نتیجه نیروهای مشخصی که روی بلوک‌ها اثر می‌گذارد را محاسبه کرد.

نرم افزار 3DEC برنامه‌ای سه‌بعدی است که بر اساس روش عددی المان مجزا، برای مدل‌سازی محیط‌های ناپیوسته به‌کار می‌رود. در مدل‌سازی عددی با استفاده از این نرم‌افزار، چگونگی ایجاد ناپیوستگی‌ها در مدل می‌تواند تأثیر زیادی بر نتایج نهایی مدل‌سازی داشته باشد. در این نرم‌افزار امکان ایجاد دسته درزه‌ها به چهار حالت منظم و مداوم، منظم و غیرمداوم، نامنظم و مداوم و نامنظم و غیرمداوم وجود دارد به‌طوری‌که برای ایجاد دسته درزه‌های نامنظم کافی است علاوه بر مقادیر متوسط مشخصات ناپیوستگی‌ها (شیب، جهت شیب و فاصله‌داری)، مقادیر انحراف معیار هریک از این پارامترها نیز در نظر گرفته شود. برای ایجاد درزه‌های غیرمداوم نیز کافی است برای هر دسته درزه یک عامل تداوم در نظر گرفته شود. لازم به ذکر است برای ایجاد چنین درزه‌هایی عامل تداوم برای یکی از دسته درزه‌ها باید برابر با یک در نظر گرفته شود [۱].

در اثر تقاطع ناپیوستگی‌ها در یک توده سنگ درزه دار بلوک‌های سنگی تشکیل می‌شود. ابعاد بلوک‌ها که متأثر از فاصله‌داری، تداوم، جهت‌داری و تعداد دسته درزه است یکی از تأثیرگذارترین پارامترها بر رفتار تودهٔ سنگ و پارامترهای مقاومتی و تغییرشکل‌پذیری آن است [۲]. کاربرد درزه‌های مداوم چنان‌چه در بیش‌تر پژوهش‌های قبلی نیز از آن استفاده شده است، منجر به کوچک در نظر گرفتن ابعاد بلوک‌ها خواهد شد. در این صورت با توجه به مقاومت بیش‌تر سنگ بکر نسبت به درزه‌ها، امکان وقوع ناپایداری افزایش خواهد یافت [۳]. انیشتین[1] و

1. Einstein

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.2.2.8 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.2.259 ]

همکاران (۱۹۸۳)، اسیوبرگ[1] (۱۹۹۶)، نیکول[2] و همکاران (۲۰۰۲) تأثیر درزه‌های غیرمداوم بر پایداری شیروانی‌ها سنگی را بررسی کرده و نشان داده‌اند در صورتی‌که درزه‌ها تداوم نداشته باشد مقاومت توده سنگ بیش‌تر شده و پایداری کلی آن افزایش می‌یابد [٤]، [٥]، [٦]. کیم[3] و همکاران (۲۰۰۷) به‌منظور برآورد ابعاد بلوک‌ها و تأثیر تداوم درزه‌ها بر آن، از مدل عددی 3DEC با سه دسته درزه متعامد و غیرمداوم استفاده کرده و نتیجه گرفته‌اند که حجم بلوک‌های تولید شده دارای توزیع لاگ نرمال بوده است و تأثیر تداوم درزه‌ها می‌تواند به‌خوبی با رابطهٔ تجربی ارائه شده به‌وسیلهٔ کای و همکاران نشان داده شود [۷].

با توجه به تأثیر عمده ابعاد بلوک‌ها بر رفتار تودهٔ سنگ، این‌که از چهار حالت موجود برای ایجاد ناپیوستگی‌ها در نرم‌افزار 3DEC کدام‌یک مناسب‌تر است موضوع مهمی است که باید به آن توجه شود. از این‌رو، با توجه به اهمیت موضوع، در این پژوهش از دیدگاه کمی موجود برای محاسبهٔ شاخص مقاومت زمین‌شناسی (GSI) ارائه شدهٔ کای[4] و همکاران، برای تعیین مناسب‌ترین حالت ایجاد دسته درزه‌ها در مدل عددی استفاده شده است. در این راستا هندسه درزه‌های تولید شده بر خلاف مدل ارائه شدهٔ کیم و همکاران (۲۰۰۷) که یک مدل تئوری است و هندسه ساده‌ای را برای درزه‌ها پیشنهاد داده است واقعی‌تر بوده است و از مشخصات سیستم ناپیوستگی‌های تکیه‌گاه چپ سد بختیاری و طبقه‌بندی GSI تودهٔ سنگ این ناحیه استفاده شده است. در نهایت مناسب‌ترین حالت ایجاد دسته درزه‌ها در مدل عددی به‌گونه‌ای که ابعاد بلوک‌های تولید شده تطابق زیادی با ابعاد بلوک‌ها در واقعیت داشته باشد پیشنهاد شده است.

## ابعاد بلوک‌ها وشاخص مقاومت زمین‌شناسی (GSI)

### ۱. حجم بلوک‌ها

تقاطع ناپیوستگی‌ها در یک توده سنگ درزه‌دار منجر به ایجاد بلوک‌های سنگی می‌شود. ابعاد بلوک‌ها که به فاصله‌داری، تداوم، تعداد دسته درزه و جهت‌داری ناپیوستگی‌ها بستگی

1. Sjoberg
2. Nichol
3. Kim
4. Cai

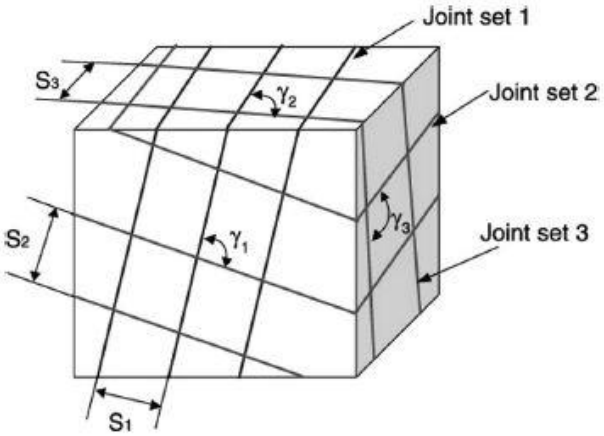
[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.2.2.8 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.2.259 ]

دارد تأثیر عمده‌ای بر رفتار تودهٔ سنگ دارد، از این‌رو، تعیین ابعاد بلوک‌ها در پژوهش‌های مهندسی مربوط به پروژه‌های عمرانی و معدنی از قبیل طراحی سیستم نگه‌داری، طراحی حفاری و آتشباری، تحلیل پایداری شیروانی‌ها و غیره امری ضروری است [۸].

کای و همکاران (۲۰۰٤) رابطهٔ (۱)را برای تعیین حجم بلوک‌ها با فرض وجود سه دسته درزه مداوم ارائه کرده‌اند [۹]:

$$V_b = \frac{S_1 S_2 S_3}{Sin\gamma_1 Sin\gamma_2 Sin\gamma_3} \qquad (۱)$$

در این رابطه $S_i$ فاصله‌داری ناپیوستگی‌ها برای دسته درزه i ام و $\gamma_i$ زاویهٔ بین دسته درزه‌ها است.




**شکل۱. بلوک‌های ایجاد شده به‌وسیلهٔ سه دسته درزه مداوم [۹]**

اگر سه دسته درزه غیرمداوم فرض شود رابطهٔ (۲) برای تعیین حجم بلوک‌ها با درنظر گرفتن عامل تداوم درزه $(P_i)$، به‌وسیلهٔ کای و همکاران (۲۰۰٤) ارائه شده است [۹]:

$$V_b = \frac{S_1 S_2 S_3}{\sqrt[3]{P_1 P_2 P_3}\, Sin\gamma_1 Sin\gamma_2 Sin\gamma_3} \qquad (۲)$$

اگر $l_i$ جمع طول درزه‌ها از دسته درزه i ام وL طول مشخصه تودهٔ سنگ مورد نظر باشد، عامل تداوم درزه را می‌توان توسط رابطه (۳) تعریف کرد[۹]:

$$P_i = \begin{cases} \frac{l_i}{L} & l_i < L \\ 1 & l_i \geq L \end{cases} \qquad (۳)$$

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.2.2.8 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.2.259 ]

### ۲. شاخص مقاومت زمین‌شناسی (GSI)

طبقه‌بندی تودهٔ سنگ داده‌های اصلی مورد نیاز در تحلیل عددی سازه‌های سنگی را فراهم می‌آورد. در طی سال‌های گذشته سیستم‌های طبقه‌بندی متعددی ایجاد شده است که یکی از معروف‌ترین این سیستم‌ها، سیستم طبقه‌بندی GSI است که به‌منظور تخمین پارامترهای مقاومتی و تغییر شکل تودهٔ سنگ استفاده می‌شود [۱۰].

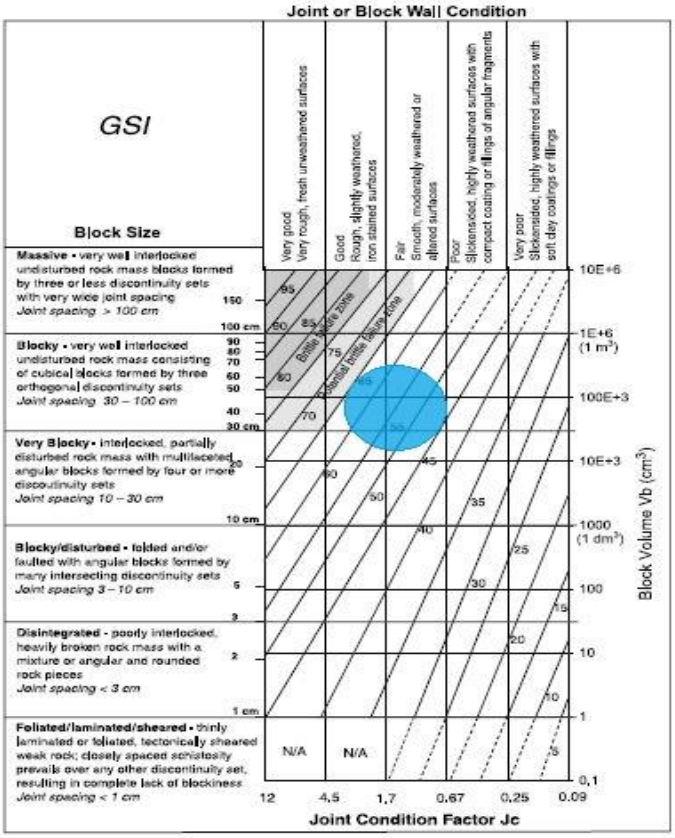
کای و همکاران (۲۰۰٤) با استفاده از حجم بلوک‌ها و عامل شرایط درزه یک روش کمی برای تعیین GSI پیشنهاد داده‌اند که در شکل ۲ نمودار کمی GSI نمایش داده شده است. از آن‌جاکه استفاده از نمودار کمی GSI برای تعیین مقدار GSI می‌تواند مشکل باشد کای و کایزر (۲۰۰٦) رابطهٔ (٤) را برای محاسبه GSI ارائه کرده‌اند. در این رابطهٔ $V_b$ حجم بلوک برحسب سانتی‌متر مکعب و $J_c$ عامل بدون بعد وابسته به شرایط درزه است [۱۱].

$$GSI = \frac{26.5+8.79*lnJ_c+0.9*lnV_b}{1+0.015*lnJ_c-0.0253*lnV_b} \quad (٤)$$

## زمین‌شناسی و مشخصات هندسی ناپیوستگی‌های تکیه‌گاه چپ سد بختیاری

سد و نیروگاه بختیاری در منطقهٔ زمین‌ساختی زاگرس در مرز زون‌های فرو افتادگی دزفول و لرستان واقع شده است. این منطقه شامل تعداد زیادی تاقدیس و ناودیس با روند شمال غربی–جنوب شرقی است که از نظر توپوگرافی به‌صورت سنگ رشته‌هایی در مجاورت یک‌دیگر قرار گرفته‌اند. در این ساختگاه سنگ بستر از آهک و آهک مارنی دارای ندول سیلیسی تشکیل شده است. به‌طورکلی ساختگاه سد بختیاری تحت تأثیر چهار سیستم ناپیوستگی است که عبارتند از یک سیستم لایه‌بندی، دو دسته درزه اصلی و یک دسته درزه فرعی که دارای کم‌ترین فراوانی است. در جدول ۱ مشخصات هندسی ناپیوستگی‌های تکیه‌گاه چپ سد بختیاری ارائه شده است [۱۲].

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.2.2.8 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.2.259 ]

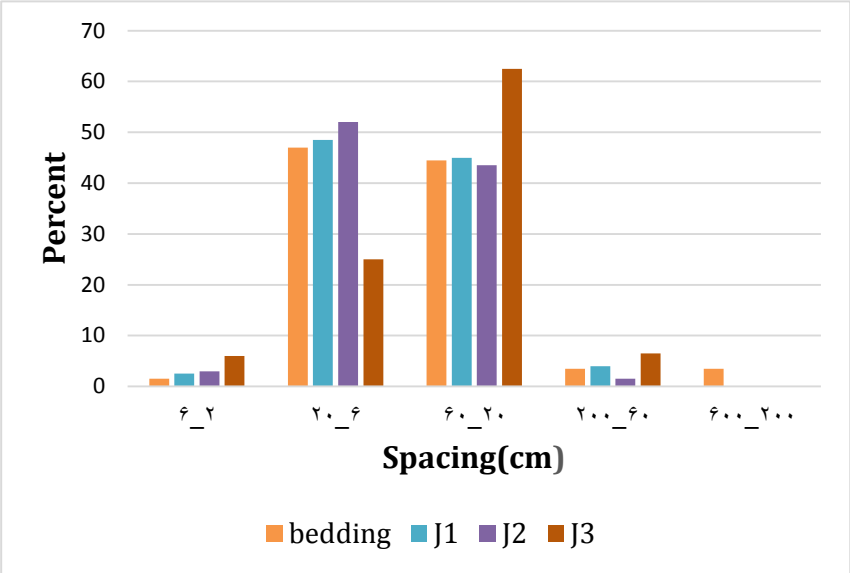



**شکل۲. نمودار کمی GSI ارائه شده به‌وسیلهٔ کای و همکاران (۲۰۰٤) [۹]**

**جدول۱. جهت‌داری ناپیوستگی‌های موجود در تکیه‌گاه چپ سد بختیاری [۱۲]**

| سیستم ناپیوستگی‌ها | شیب (درجه) | | جهت شیب (درجه) | |
|---|---|---|---|---|
| | میانگین | انحراف معیار | میانگین | انحراف معیار |
| **لایه‌بندی** | ٦۹ | ۸/٦ | ۲۱٦ | ٦/۱ |
| **دسته درزه ۱** | ٦٦ | ۱۳/۵ | ۳۱۵ | ۱۰/۹ |
| **دسته درزه ۲** | ۵۹ | ۱۵ | ۱۲۳ | ۱۱/٤ |
| **دسته درزه ۳** | ۱۵ | ٤/٦ | ۳۱ | ٦/٦ |

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.2.2.8 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.2.259 ]




**شکل۳. توزیع فاصله داری ناپیوستگی‌های موجود در ساختگاه سد بختیاری[۱۲]**

## تعیین روش مناسب ایجاد درزه‌ها با توجه به حجم بلوک‌های تولید شده

ابعاد بلوک‌ها از مهم‌ترین پارامترها در تودهٔ سنگ درزه‌دار است که رفتار تودهٔ سنگ را تحت تأثیر قرار می‌دهد. بنابراین با توجه به تأثیر ابعاد بلوک‌ها در رفتار تودهٔ سنگ در این بخش برای تعیین روش مناسب ایجاد درزه‌ها از دیدگاه کمی موجود در مورد شاخص مقاومت زمین‌شناسی (GSI) که براساس توصیف زمین‌شناسی تودهٔ سنگ شامل دو عامل ابعاد بلوک و شرایط سطح درزه تعیین می‌شود استفاده شده است. از این رو، به‌منظور انتخاب روش مناسب ایجاد درزه‌ها مقادیر GSI و حجم بلوک‌ها در نظر گرفته شده و با مدل‌سازی حالت‌های مختلف ایجاد درزه‌ها، مناسب‌ترین حالت ایجاد دسته درزه‌ها در مدل عددی که ابعاد بلوک‌های تولید شده به‌وسیلهٔ آن تطابق بیش‌تری با ابعاد بلوک‌ها در واقعیت داشته باشد پیشنهاد شده است.

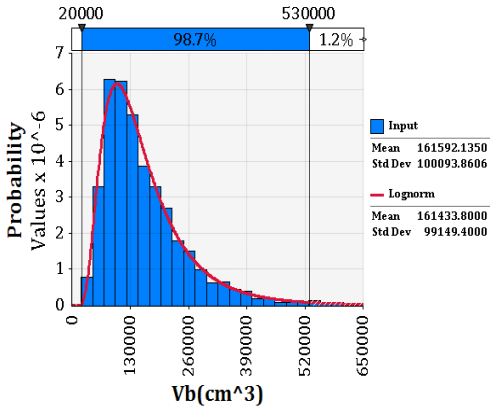
[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.2.2.8 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.2.259 ]

### ۱. تعیین ابعاد بلوک‌ها براساس پژوهش‌های انجام شده در ناحیه

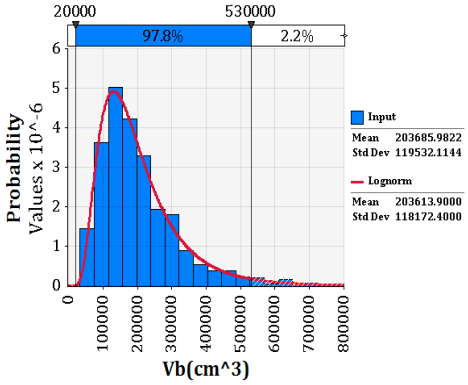
با توجه به برداشت‌های صحرایی و درزه‌نگاری‌های انجام شده در گالری‌های احداث شده در ساختگاه سد بختیاری، طبقه‌بندی تودهٔ سنگ به‌روش $RMR_{89}$ انجام شده و پس از آن براساس دامنه در نظر گرفته شده برای $RMR_{89}$ و با در نظر گرفتن وضعیت تودهٔ سنگ، مقدار GSI تخمین زده شده که در شکل ۲ دامنه GSI برای تکیه‌گاه چپ سد بختیاری نشان داده شده است.

باتوجه به شکل۲ در این ساختگاه حجم بلوک‌ها از حدود ۲۰۰۰۰ تا ۵۳۰۰۰۰ سانتی‌متر مکعب متغیر است که این موضوع با فرمول‌های ارائه شدهٔ کای و همکاران (۲۰۰٤) نیز قابل اثبات است.

برای اثبات این موضوع با توجه به فراوانی بسیارکم دسته درزه ۳، توزیع حجم بلوک‌ها با فرض وجود سه‌دسته درزه مداوم با توجه به اطلاعات ارائه شده در جدول ۱ و شکل ۳ که با استفاده از فرمول‌های ارائه شدهٔ کای و همکاران، با نرم‌افزار @RISK برآورد شده در شکل ٤ نمایش داده شده است. هم‌چنین در شکل ۵ توزیع حجم بلوک‌ها با فرض وجود دسته درزه‌های غیرمداوم نمایش داده شده است. با توجه به مشکل بودن تعیین تداوم درزه‌ها در برداشت‌های صحرایی، مقادیر تقریبی $P_1=1$،$P_2=0.8$،$P_3=0.6$ به‌ترتیب برای لایه‌بندی، دسته درزه ۱ و ۲ با در نظر گرفتن خصوصیات این ناپیوستگی‌ها لحاظ شده است.




**شکل٤. توزیع حجم بلوک‌ها با فرض سه دسته درزه مداوم**




**شکل۵. توزیع حجم بلوک‌ها بافرض وجود درزه‌های غیرمداوم**

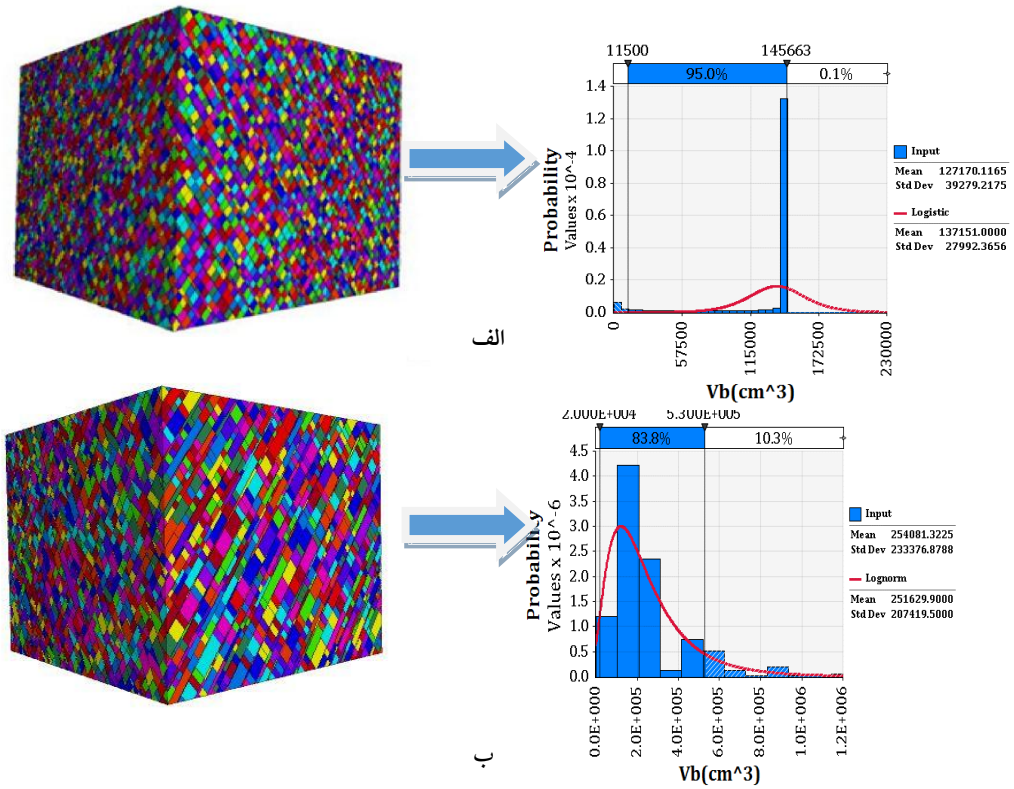
[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.2.2.8 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.2.259 ]

$(P_3=0.6،P_2=0.8،P_1=1)$

با توجه به شکل‌های ٤ و ٥ حجم بلوک‌های تولید شده دارای توزیع لاگ نرمال بوده است و بیش از ۹۷ درصد حجم بلوک‌ها تولید شده بین ۲۰۰۰۰تا ۵۳۰۰۰۰ سانتی مترمکعب قرار دارد که با مقادیر ارائه شده توسط نمودار GSI انطباق زیادی دارد.

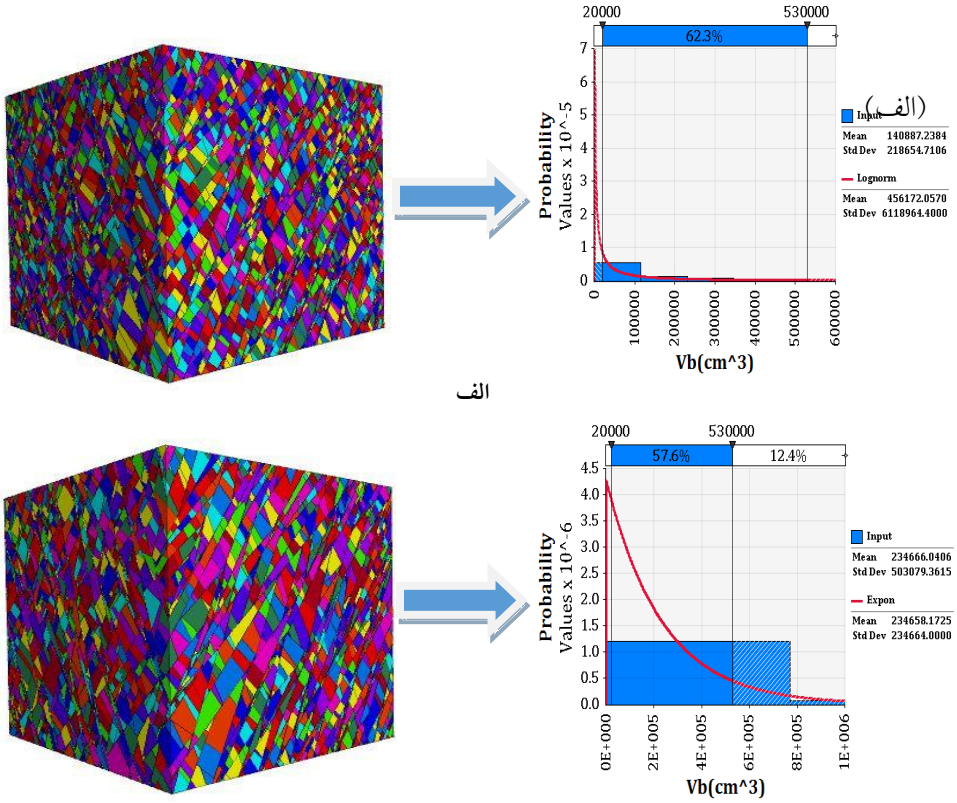
## ۲. تعیین ابعاد بلوک‌ها برای حالت‌های مختلف ایجاد درزه‌ها

به‌منظور تعیین ابعاد بلوک‌ها در حالت‌های مختلف ایجاد درزه‌ها، چهار مدل مکعبی‌شکل با ابعاد ۲۰*۲۰*۲۰متر با انواع حالات ممکن برای ایجاد درزه‌ها با نرم‌افزار 3DEC ساخته شده است که در شکل ٦ نمایی از مدل‌های ساخته شده همراه با تابع توزیع حجم بلوک‌ها برای درزه‌های منظم و در شکل ۷ برای درزه‌های نامنظم نمایش داده شده است.




**شکل٦. مدل‌های ساخته شده با درزه‌های منظم همراه با تابع توزیع حجم بلوک‌های تولید شده**
**الف) درزه‌های منظم و مداوم، ب)درزه‌های منظم و غیرمداوم**

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.2.2.8 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.2.259 ]

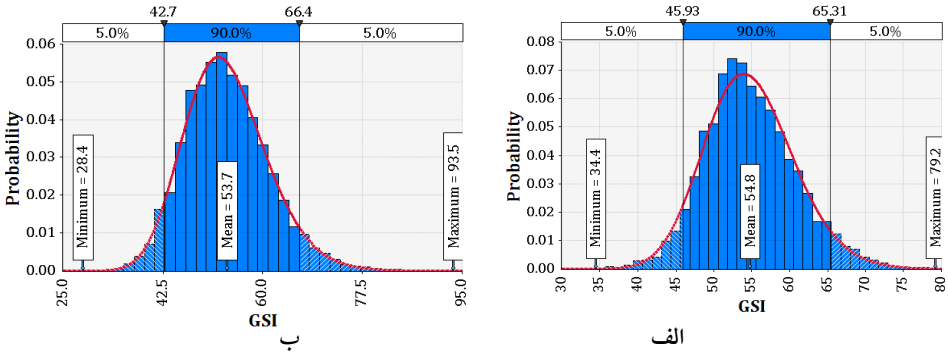



**شکل۷. مدل‌های ساخته شده با درزه‌های نامنظم همراه با تابع توزیع حجم بلوک‌های تولید شده الف) درزه‌های نامنظم و مداوم، ب) درزه‌های نامنظم و غیر مداوم**

مقایسهٔ نتایج حاصل از مدل‌سازی حالت‌های مختلف ایجاد درزه‌ها با نتایج حاصل از پژوهش‌های انجام شده در ناحیه نشان می‌دهد که با ایجاد درزه‌ها به‌صورت نامنظم در هر دو حالت مداوم و غیرمداوم، حجم بلوک‌های تولید شده توزیع مناسبی ندارد و در این حالت حجم بلوک‌های از چند سانتی مترمکعب تا چندین مترمکعب متغیر است و هرچه ابعاد مدل بزرگ‌تر شود ابعاد بلوک‌های ایجاد شده نیز بزرگ‌تر می‌شود. هم‌چنین در این حالت برای درزه‌های مداوم تنها ٪۶۲/۳ و برای درزه‌های غیرمداوم تنها ٪۵۷/۶ بلوک‌های تولید شده حجمی بین ۲۰۰۰۰تا۵۳۰۰۰۰ سانتی‌متر مکعب دارند. در شکل ۸ نیز تابع توزیع GSI که با

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.2.2.8 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.2.259 ]

استفاده از توزیع حجم بلوک‌های حاصل از مدل‌سازی عددی برای درزه‌های نامنظم و براساس فرمول کمی ارائه شدهٔ کای وکایزر (۲۰۰۶)، به‌کمک شبیه‌سازی مونت کارلو با استفاده از نرم‌افزار RISK@ به‌دست آمده نمایش داده شده است. با توجه به شکل محدودهٔ GSI به‌دست آمده در این حالت تفاوت زیادی با محدودهٔ GSI حاصل از بررسی‌های انجام شده در ناحیه دارد. از این رو، از لحاظ حجم بلوک‌های تولید شده و محدودهٔ GSI به‌دست آمده برای آن‌ها، ایجاد درزه‌ها به‌صورت نامنظم روش مناسبی نیست.

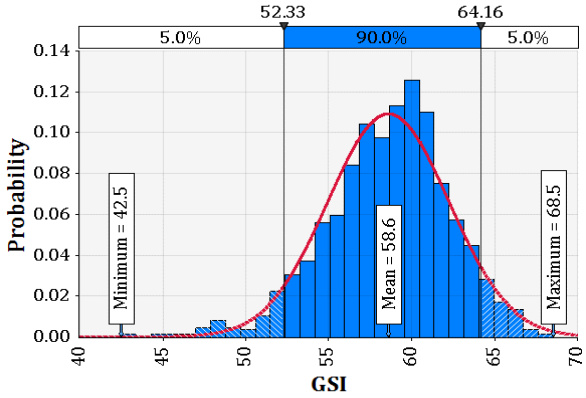



**شکل ۸. تابع توزیع GSI حاصل از فرمول کای و کایزر و شبیه‌سازی مونت کارلو**
**الف) درزه‌های نامنظم و مداوم، ب) درزه‌های نامنظم و غیرمداوم**

ایجاد درزه‌های منظم و مداوم نیز به‌دلیل این‌که اکثر بلوک‌های ایجاد شده کوچک هستند و حجم مربوط به ۷۶٪ آن‌ها برابر با ۱۴۳۱۶۶سانتی‌متر مکعب است و نیز تطابق نداشتن تابع توزیع حجم بلوک‌ها با تابع توزیع حاصل از فرمول کای وهمکاران، چنان‌که انتظار می‌رفت نمی‌تواند روش مناسبی برای ایجاد درزه باشد. اما با ایجاد درزه‌ها به‌صورت منظم و غیرمداوم تابع توزیع حجم بلوک‌های حاصل از مدل عددی همانند تابع توزیع حجم بلوک‌های حاصل از فرمول کای و همکاران، لاگ نرمال بوده است و در این حالت بیش از ۸۰٪ بلوک‌ها حجمی بین ۲۰۰۰۰ تا ۵۳۰۰۰۰ سانتی‌متر مکعب دارند. هم‌چنین با توجه به شکل ۹ که در آن تابع توزیع GSI براساس توزیع حجم بلوک‌های حاصل از مدل‌سازی عددی برای این حالت نمایش داده شده است، از لحاظ ابعاد بلوک‌های تولید شده و محدودهٔ GSI حاصل از آن برای ایجاد

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.2.2.8 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.2.259 ]

درزه‌ها در مدل‌سازی عددی تکیه‌گاه چپ سد بختیاری با استفاده از 3DEC مناسب‌ترین حالت، ایجاد درزه‌ها به‌صورت منظم و غیرمداوم است.




**شکل ۹. تابع توزیع GSI حاصل از فرمول کای و کایزر و شبیه‌سازی مونت‌کارلو (درزه‌های منظم و غیرمداوم)**

تداوم درزه‌ها تأثیر عمده‌ای بر ابعاد بلوک‌های سنگی تولید شده دارد. با توجه به تأثیر ابعاد بلوک‌ها بر رفتار تودهٔ سنگ و پارامترهای مقاومتی و تغییرشکل‌پذیری آن، تعیین تداوم درزه‌ها موضوعی مهم و در عین حال یکی از سخت‌ترین مباحث در مکانیک سنگ است. در این راستا با توجه به اهمیت دقیق بودن تداوم درزه‌ها از یک سو و مشکل بودن تعیین تداوم درزه‌ها در برداشت‌های صحرایی از سوی دیگر روشی به‌منظور تعیین دقیق‌تر تداوم درزه‌ها به‌منظور مدل‌سازی عددی با استفاده از نرم‌افزار 3DEC ارائه می‌شود.

## تعیین عامل تداوم درزه‌ها ($P_i$)

کیم و همکاران (۲۰۰۷) برای تعیین حجم بلوک‌ها با فرض وجود درزه‌های غیرمداوم به‌منظور تخمین GSI با توجه به مشکل بودن تعیین تدوام درزه در برداشت‌های صحرایی، حالات مختلف را در نظر گرفته و با مدل‌سازی عددی المان مجزا، حجم بلوک‌ها را به‌منظور تعیین GSI برآورد کردند [۳]. به‌منظور تعیین عامل تداوم درزه‌ها ایدهٔ کلی از روش آن‌ها گرفته شده و در اینجا با توجه به مشخص بودن GSI و حجم بلوک‌ها بر اساس بررسی‌های انجام شده در ناحیه، انواع حالت‌های ممکن برای عامل تداوم درزه در نظر گرفته شده سپس از

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.2.2.8 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.2.259 ]

طریق مدل‌سازی عددی با نرم‌افزار3DEC توزیع حجم بلوک‌ها برای هر حالت به‌دست آمده است و با مقایسه حجم بلوک‌های تولید شده با محدوده حجم بلوک‌ها در ساختگاه مورد نظر مناسب‌ترین حالت برای تداوم درزه‌ها انتخاب شده است.

در نرم‌افزار 3DEC برای ایجاد درزه‌ها به‌صورت غیرمداوم عامل تداوم برای دسته‌ای از درزه‌ها باید برابر با یک در نظر گرفته شود. در این راستا عامل تداوم برای لایه‌بندی یک در نظر گرفته شده و با در نظر گرفتن انواع حالات ممکن عامل تداوم درزه‌ها برای دسته درزه ۱ و ۲ مدل‌سازی عددی انجام شده که نتایج آن در جدول ۲ ارائه شده است.

با توجه به جدول ۲ در حالتی که $P_1=1$،$P_2=0.6$،$P_3=0.8$ نسبت به سایر حالت‌ها حجم تعداد بیش‌تری از بلوک‌های تولید شده (۸۵/٤ ٪) در محدوده ۲۰۰۰۰ تا ۵۳۰۰۰۰ سانتی‌متر مکعب است، از این‌رو، برای ایجاد درزه‌های غیرمداوم در نرم‌افزار 3DEC برای تکیه‌گاه چپ سد بختیاری بهتر است این حالت برای عامل تداوم درزه‌ها در نظر گرفته شود.

**جدول ۲. نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی با در نظر گرفتن انواع حالات ممکن برای عامل تداوم درزه**

| درصد حجم بلوک‌ها در بازه (20000-530000) | $P_3$ | $P_2$ | $P_1$ | درصد حجم بلوک‌ها در بازه (20000-530000) | $P_3$ | $P_2$ | $P_1$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ۷۲ | ۰/٦ | ۰/۵ | ۱ | ۱۷/۸ | ۰/۱ | ۰/۱ | ۱ |
| ۷۵/۳ | ۰/۷ | ۰/۵ | ۱ | ۱۹/٦ | ۰/۲ | ۰/۱ | ۱ |
| ۷٦/۸ | ۰/۸ | ۰/۵ | ۱ | ۲۲/۷ | ۰/۳ | ۰/۱ | ۱ |
| ۸۱/٤ | ۰/۹ | ۰/۵ | ۱ | ۲٤/۹ | ۰/٤ | ۰/۱ | ۱ |
| ۳۰/۱ | ۰/۱ | ۰/٦ | ۱ | ۲۷/۷ | ۰/۵ | ۰/۱ | ۱ |
| ٤۲/۷ | ۰/۲ | ۰/٦ | ۱ | ۳۲/۷ | ۰/٦ | ۰/۱ | ۱ |
| ۵٤/۳ | ۰/۳ | ۰/٦ | ۱ | ۳٤/۲ | ۰/۷ | ۰/۱ | ۱ |
| ٦۱/۸ | ۰/٤ | ۰/٦ | ۱ | ۳٦/۲ | ۰/۸ | ۰/۱ | ۱ |
| ۷۰/٦ | ۰/۵ | ۰/٦ | ۱ | ۳٦/۷ | ۰/۹ | ۰/۱ | ۱ |
| ۷٤/٤ | ۰/٦ | ۰/٦ | ۱ | ۱۸/۱ | ۰/۱ | ۰/۲ | ۱ |
| ۸۰/۸ | ۰/۷ | ۰/٦ | ۱ | ۲۵/۹ | ۰/۲ | ۰/۲ | ۱ |
| ۸۵/٤ | ۰/۸ | ۰/٦ | ۱ | ۳۳/۳ | ۰/۳ | ۰/۲ | ۱ |
| ۸٤/۳ | ۰/۹ | ۰/٦ | ۱ | ۳۷ | ۰/٤ | ۰/۲ | ۱ |

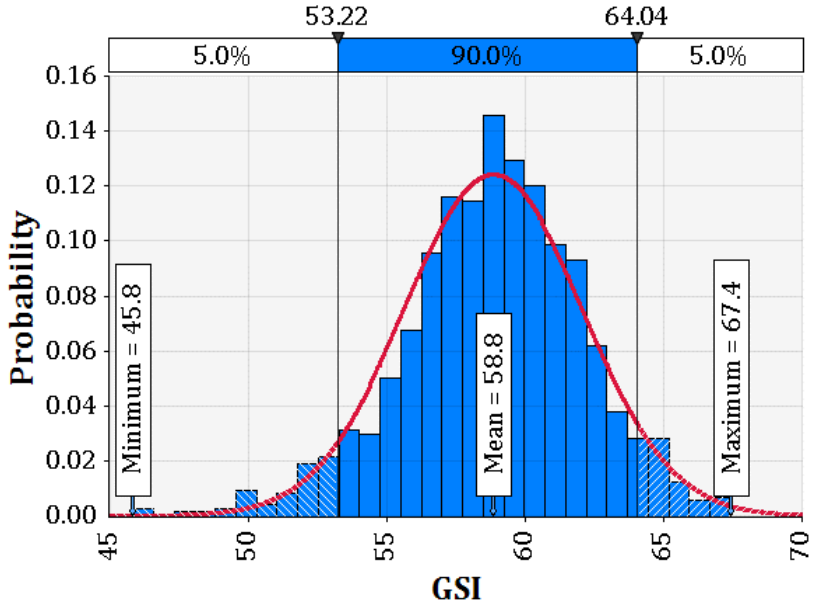
[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.2.2.8 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.2.259 ]

| درصد حجم بلوک‌ها در بازه (20000-530000) | $P_3$ | $P_2$ | $P_1$ |
|---|---|---|---|
| ۳۱/۱ | ۰/۱ | ۰/۷ | ۱ |
| ٤٦/۷ | ۰/۲ | ۰/۷ | ۱ |
| ۵۸/۳ | ۰/۳ | ۰/۷ | ۱ |
| ٦۷/۵ | ۰/٤ | ۰/۷ | ۱ |
| ۷۵/۲ | ۰/۵ | ۰/۷ | ۱ |
| ۸۱ | ۰/٦ | ۰/۷ | ۱ |
| ۸٤/٤ | ۰/۷ | ۰/۷ | ۱ |
| ۸۳ | ۰/۸ | ۰/۷ | ۱ |
| ۸۲/٦ | ۰/۹ | ۰/۷ | ۱ |
| ۳۳/۱ | ۰/۱ | ۰/۸ | ۱ |
| ٤۹/۳ | ۰/۲ | ۰/۸ | ۱ |
| ٦۲/٤ | ۰/۳ | ۰/۸ | ۱ |
| ۷۱ | ۰/٤ | ۰/۸ | ۱ |
| ۷۹/۲ | ۰/۵ | ۰/۸ | ۱ |
| ۸۳/۸ | ۰/٦ | ۰/۸ | ۱ |
| ۸٤/٦ | ۰/۷ | ۰/۸ | ۱ |
| ۸۳/۱ | ۰/۸ | ۰/۸ | ۱ |
| ۸۱/٤ | ۰/۹ | ۰/۸ | ۱ |
| ۳٤/۳ | ۰/۱ | ۰/۹ | ۱ |
| ۵۲ | ۰/۲ | ۰/۹ | ۱ |
| ٦۳/۸ | ۰/۳ | ۰/۹ | ۱ |
| ۷۳ | ۰/٤ | ۰/۹ | ۱ |
| ۸۱/۳ | ۰/۵ | ۰/۹ | ۱ |
| ۸۳/۸ | ۰/٦ | ۰/۹ | ۱ |
| ۸۳/۱ | ۰/۷ | ۰/۹ | ۱ |
| ۸۲/٤ | ۰/۸ | ۰/۹ | ۱ |
| ۸۰/٦ | ۰/۹ | ۰/۹ | ۱ |

| درصد حجم بلوک‌ها در بازه (20000-530000) | $P_3$ | $P_2$ | $P_1$ |
|---|---|---|---|
| ٤۱ | ۰/۵ | ۰/۲ | ۱ |
| ٤۳/۵ | ۰/٦ | ۰/۲ | ۱ |
| ٤۵/۲ | ۰/۷ | ۰/۲ | ۱ |
| ۵۲/۵ | ۰/۸ | ۰/۲ | ۱ |
| ۵٤/۲ | ۰/۹ | ۰/۲ | ۱ |
| ۲۳/٤ | ۰/۱ | ۰/۳ | ۱ |
| ۳۱ | ۰/۲ | ۰/۳ | ۱ |
| ٤۱ | ۰/۳ | ۰/۳ | ۱ |
| ٤۳ | ۰/٤ | ۰/۳ | ۱ |
| ٤۹/۲ | ۰/۵ | ۰/۳ | ۱ |
| ۵۲/۳ | ۰/٦ | ۰/۳ | ۱ |
| ۵۸/۱ | ۰/۷ | ۰/۳ | ۱ |
| ٦۲/۷ | ۰/۸ | ۰/۳ | ۱ |
| ٦٦/۸ | ۰/۹ | ۰/۳ | ۱ |
| ۲۳/۳ | ۰/۱ | ۰/٤ | ۱ |
| ۳۵/۱ | ۰/۲ | ۰/٤ | ۱ |
| ٤٤/۳ | ۰/۳ | ۰/٤ | ۱ |
| ۵۲/۳ | ۰/٤ | ۰/٤ | ۱ |
| ٦۵/۷ | ۰/۵ | ۰/٤ | ۱ |
| ٦۲/٦ | ۰/٦ | ۰/٤ | ۱ |
| ٦۷/۸ | ۰/۷ | ۰/٤ | ۱ |
| ۷۲/٤ | ۰/۸ | ۰/٤ | ۱ |
| ۷٦/۲ | ۰/۹ | ۰/٤ | ۱ |
| ۲۷/۱ | ۰/۱ | ۰/۵ | ۱ |
| ۳۹/۲ | ۰/۲ | ۰/۵ | ۱ |
| ٤۹/٤ | ۰/۳ | ۰/۵ | ۱ |
| ۵۸/۳ | ۰/٤ | ۰/۵ | ۱ |
| ٦٤/۹ | ۰/۵ | ۰/۵ | ۱ |

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.2.2.8 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.2.259 ]

در شکل ۱۰ تابع توزیع GSI برای مناسب‌ترین حالت انتخاب شده برای عامل تداوم درزه‌ها که بر اساس توزیع حجم بلوک‌های حاصل از مدل‌سازی عددی و فرمول کمی ارائه شدهٔ کای و کایزر (۲۰۰٦)، به‌وسیلهٔ شبیه‌سازی مونت‌کارلو تعیین شده نمایش داده شده است.




**شکل ۱۰. تابع توزیع GSI حاصل از فرمول کای و کایزر (۲۰۰٦) و شبیه‌سازی مونت کارلو**

چنان‌که ملاحظه می‌شود مقادیر GSI به‌دست آمده با استفاده از شبیه‌سازی مونت‌کارلو در این حالت با محدوده تعیین شده حاصل از پژوهش‌های انجام شده در ناحیهٔ (GSI=٤٥-٦٥) تطابق زیادی دارد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که با در نظر گرفتن این حالت برای عامل تداوم درزه‌ها، ابعاد بلوک‌های تولید شده تطابق زیادی با ابعاد بلوک‌ها در واقعیت دارد.

## بحث و نتیجه‌گیری

در مدل‌سازی عددی با استفاده از روش المان مجزا، چگونگی ایجاد ناپیوستگی‌ها گامی تعیین‌کننده است و تأثیر عمده‌ای بر نتایج مدل‌سازی دارد. در نرم‌افزار 3DEC امکان ایجاد دسته درزه‌ها به چهار حالت منظم و مداوم، منظم و غیرمداوم، نامنظم و مداوم و نامنظم و

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.2.2.8 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.2.259 ]

غیرمداوم وجود دارد. با توجه به تأثیر ابعاد بلوک‌ها در رفتار توده سنگ، این‌که از چهار حالت موجود کدام یک مناسب‌تر است و بیان‌کننده شرایط واقعی تودهٔ سنگ است موضوع مهمی است که باید به آن توجه شود. از این‌رو، در این پژوهش به‌منظور تعیین مناسب‌ترین حالت برای ایجاد درزه‌ها در مدل عددی، از دیدگاه کمی ارائه شدهٔ کای و همکاران برای محاسبهٔ شاخص مقاومت زمین‌شناسی (GSI) که در آن ابعاد بلوک‌ها به‌عنوان پارامتری اثرگذار مورد نیاز است بهره گرفته شد و با استفاده از مشخصات سیستم ناپیوستگی‌های تکیه‌گاه چپ سد بختیاری و طبقه‌بندی GSI تودهٔ سنگ این ناحیه، مناسب‌ترین روش ایجاد دسته درزه‌ها با توجه به ابعاد بلوک‌های تولید شده پیشنهاد شد.

در این راستا ابتدا حجم بلوک‌ها براساس پژوهش‌های انجام شده در ناحیه و استفاده از فرمول‌های ارائه شدهٔ کای و همکاران تخمین زده شد و مشخص شد که حجم بلوک‌ها در این ساختگاه حدود ۲۰۰۰۰ تا۵۳۰۰۰۰ سانتی‌مترمکعب بوده است و دارای توزیع لاگ نرمال است. سپس با مدل‌سازی حالت‌های مختلف ایجاد درزه‌ها و تعیین توزیع حجم بلوک‌ها و GSI، مشخص شد که از لحاظ حجم بلوک‌های تولید شده و نوع تابع توزیع، مناسب‌ترین حالت برای ایجاد درزه‌ها به‌منظورمدل‌سازی عددی در این ساختگاه، استفاده از درزه‌های منظم و غیرمداوم است.

در بخش پایانی نیز با توجه به مشکل بودن تعیین دقیق عامل تداوم درزه‌ها به‌منظور ایجاد درزه‌های غیرمداوم در برداشت‌های صحرایی، با توجه به مشخص بودن GSI وحجم بلوک‌ها، مدل‌سازی عددی با استفاده از 3DEC برای‌انواع حالت‌های ممکن در مورد عامل تداوم درزه انجام شد. سپس با مقایسه حجم بلوک‌ها حاصل از مدل‌سازی عددی برای هر حالت با محدوده حجم بلوک‌ها حاصل از بررسی‌های انجام شده در ساختگاه، مناسب‌ترین حالت برای عامل تداوم درزه‌ها به‌گونه‌ای که ابعاد بلوک‌های تولید شده تطابق زیادی با واقعیت داشته باشد انتخاب شد.

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.2.2.8 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.2.259 ]

## منابع

1. Itasca Consulting Group Inc, 3DEC User's Guide, Ver 5.0, Minneapolis, Minnesota (2013).
2. Palmstrom A.,"In-Situ Characterization of rocks,chapter2, measurement and characterization of rock mass jointing", Balkema Publishers (2001).
3. Einstein H. H., "Modern developments in discontinuity analysis, the persistence-connectivity problem In: Comprehensive rock engineering", Pergamon Press, Oxford (1993) 193-213.
4. Einstein H. H., Veneziano D., Baecher G., O'Reilly K., "The effect of discontinuity persistence on rock slope stability", Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr. 20 (5) (1983) 227-236.
5. Sjoberg J., "Large scale slope stability in open pit mining-a review", Technical Report, Lulea University of Technology, Division of Rock Mechanics, Lulea, Sweden (1996) 229.
6. Nichol S. L., Hungr O., Evans S. G., "Large-scale brittle and ductile toppling of rockslopes", Can. Geotech. J. 39 (2002) 773-788.
7. Kim B. H., Cai M., Kaiser P. K., Yang H. S., "Estimation of Block Sizes for Rock Masses with Non-persistent Joints", Rock Mechanics and Rock Engineering,40(2) (2007)169-192.
8. Elmouttie M. K., Poropat G. V., "A Method to Estimate In Situ Block Size Distribution", Rock Mechanics and Rock Engineering,45 (2012) 40-407.
9. Cai M., P. K. Kaiser H. Uno Y. Tasaka, Minami M., "Estimation of rock mass strength and deformation modulus of jointed hard rock masses usingthe GSI system", Int'l Journal of Rock Mechanics &Mining Sciences 41(1) ( 2004) 3-19.

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.2.2.8 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.2.259 ]

10. Kim B. H., Peterson R. L., Katsaga T., Pierce M. E.,"Estimation of Rock Block Size Distribution forDetermination of Geological Strength Index (GSI)using Discrete Fracture Networks (DFNs)", DFNE (2014) 124.

11. Cai M., Kaiser P. K., "Visualization of rockmass classification systems", Geotechn, Geol. Engng., 24 (2006) 1089-1102.

12. Dietler T., Mehinrad A., Chehreh H., "Geology Report of Bakhtiary Dam and Hydroelectric Power Project", Stucky Pars Engineering Company and Poyry Company and Moshanir Company (2009).

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29 ]

[ DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.2.2.8 ]

[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.2.259 ]