

مطالعه پارامترهای آماری توصیف کننده پروفیل درز

رضا اشجاری^۱، مرتضی احمدی^{۱*}، کامران گشتاسبی^۱ مصطفی شریفزاده^۲

پذیرش مقاله: ۹۰/۱۰/۷

دریافت مقاله: ۹۰/۱۱/۱۶

چکیده

بررسی و تشریح هندسه سطح درز در مطالعات رفتار مکانیکی و هیدرومکانیکی درزه‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. از روش‌های کمی سازی مطالعه درز، استفاده از پارامترهای آماری جهت تشریح هندسه درز می‌باشد. در روش آماری، پارامترهای مختلفی مانند متوسط ارتفاع خط مرکزی (CLA)، مجذور میانگین مربعات ارتفاع (RMS)، Z_2 و پارامتر زبری (RL) مورد استفاده قرار می‌گیرد. در بیشتر مطالعات انجام شده، عموماً جهت تشریح زبری از یک پارامتر استفاده شده است (عموماً پارامترهای Z_2 یا RL مورد استفاده قرار گرفته‌اند). در این تحقیق، عملکرد هریک از پارامترهای آماری به منظور بررسی زبری پروفیل‌های درز، مورد ارزیابی قرار گرفته است. بدین منظور از پروفیل‌های بارتون و پروفیل‌هایی با هندسه منظم استفاده شده است. پروفیل‌های مورد ارزیابی با استفاده از نرم‌افزار، رقوم سازی شده و پارامترهای آماری مختلف آن‌ها محاسبه شده‌اند. نتایج تحقیق حاکی از آن است که برای مطالعه دقیق رفتار ناپیوستگی‌ها، استفاده از یک یا تعداد معدودی پارامتر آماری، جهت توصیف هندسه درزه‌ها مناسب نمی‌باشد.

کلید واژه‌ها: درز، پارامتر، هندسه درز، فاصله برداشت، زبری

۱. دانشگاه تربیت مدرس، بخش معدن، گروه مکانیک سنگ

۲. دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده معدن و متالورژی

* مسئول مکاتبات

۱. مقدمه

رفتار ناپیوستگی‌ها و مقاومت برشی آن‌ها به وسیله مشخصات سطح درز تحت تأثیر قرار می‌گیرد. لذا تشریح دقیق هندسه سطح، موضوع مهمی در ارزیابی رفتار مکانیکی ناپیوستگی‌ها است. یکی از مشخصات درز، زبری سطح درز می‌باشد. در مجموع هندسه سطح درز، معمای رفتار درز در شرایط مختلف می‌باشد. مشخص‌سازی این پارامتر به انتخاب مناسب پارامترها بستگی دارد. بدین منظور (Barton & Chouby, 1977) پارامتر JRC را به منظور تعیین پارامتر زبری معرفی نمودند. لیکن باید به خاطر داشت که نمی‌توان تنها با یک پارامتر، زبری را مشخص نمود، زیرا زبری شامل مشخصات مورفولوژیکی مانند ارتفاع نقاط سطح (ارتفاع دندانه‌ها)، زاویه‌داری (شیب‌ها و زوایا)، موج‌داری (تناوب)، ناهمسانی و ... است. از سویی پارامتر JRC از طریق مقایسه چشمی پروفیل درز با پروفیل‌های استاندارد بارتون تعیین می‌شود. زبری براساس مقایسه چشمی با خط‌های فاحشی همراه است که می‌تواند منجر به تخمین‌های نامناسبی از مقاومت برشی درز شود.

تلاش‌های متعددی به منظور کمی‌سازی هندسه درز صورت گرفته است. در مجموع روش‌های کمی‌سازی زبری را می‌توان به سه گروه مدل‌های آماری، مدل‌های زمین‌آماری و مدل‌های فراکتالی تقسیم‌بندی نمود. جهت کمی‌سازی هندسه درز، در مدل‌های آماری از پارامترهای مختلفی مانند CLA، RMS، Z₂، RL و ... استفاده می‌شود.

(1998) Lee et al., (1996) Dove & Frost, (1990) Drury & Gokhale جهت کمی‌سازی هندسه درز از پارامتر RL استفاده نمودند. پارامتر مجذور میانگین مربعات مشتق اول پروفیل (Z₂) توسط Myers (1962) و پارامتر تابع ساختاری (SF) توسط Sayles & Thomas (1977) معرفی شدند. Maerz et al. (1990) رابطه بین RL و JRC را بررسی نمودند. Tse & Curden (1979) به منظور کمی‌سازی پروفیل درز از پارامترهای RMS، ACF، Z₂ و SF استفاده نموده و ارتباط JRC را با پارامترهای Z₂ و SF محاسبه نمودند. Cruden

(1979) Tse & و (2001) Yang et al. روابطی را بین JRC

و SF پیشنهاد نمودند.

در این تحقیق تلاش شده است با استفاده از پروفیل‌های بارتون و پروفیل‌هایی با هندسه منظم، پارامترهای آماری مورد استفاده جهت کمی‌سازی هندسه درز، مورد بررسی قرار گرفته و کفایت این مدل‌ها مورد ارزیابی قرار گیرد.

۲. معرفی پارامترهای زبری

محققین تلاش نموده‌اند زبری درز را با استفاده از پارامترهای آماری به کمیت درآورند. پارامترهای آماری توصیف‌کننده هندسه درز به دو گروه پارامترهای دامنه‌ای (ارتفاعی) و پارامترهای زاویه‌ای تقسیم‌بندی می‌شوند. متداول‌ترین پارامترهای توصیف‌کننده سطح درز، متوسط ارتفاع خط مرکزی (Centre Line Average height, CLA)، مجذور میانگین مربعات ارتفاع (Root Mean-Square of height, RMS)، Z₂ (RMS of the first derivative of profile)، تابع همبستگی (Auto Correlation Function, ACF)، تابع ساختاری (Structure Function, SF) و پارامتر زبری درز (Relative Length, RL) می‌باشد.

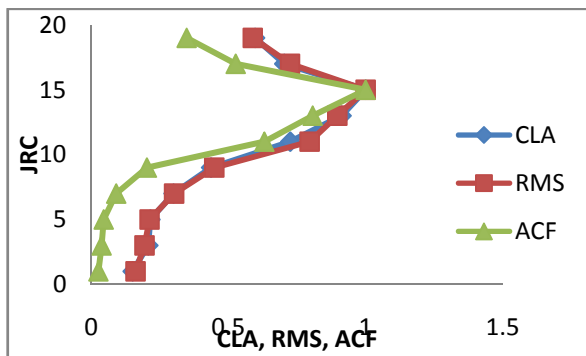
متوسط ارتفاع خط مرکزی (CLA): این پارامتر بصورت متوسط ارتفاع پروفیل نسبت به یک خط مبنا تعیین می‌شود (Hong et al., 2008 Aydan et al; 1996):

$$CLA = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |y_i| \quad (1)$$

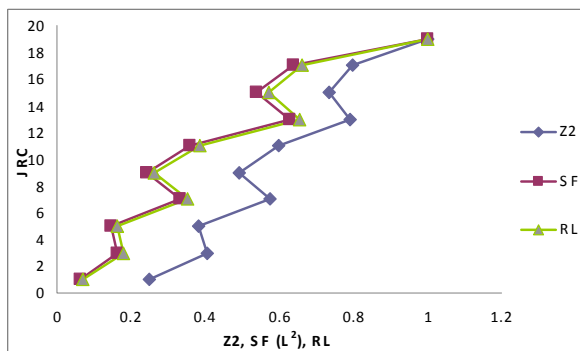
در این پارامتر y_i ارتفاع پروفیل نسبت به یک خط مبنا است. N تعداد نقاط برداشت شده می‌باشد.

مجذور میانگین مربعات ارتفاع (RMS): این پارامتر انحراف استاندارد توزیع ارتفاعی پروفیل را تعیین می‌کند. (Aydan et al., 1996, Hong et al., 2008):

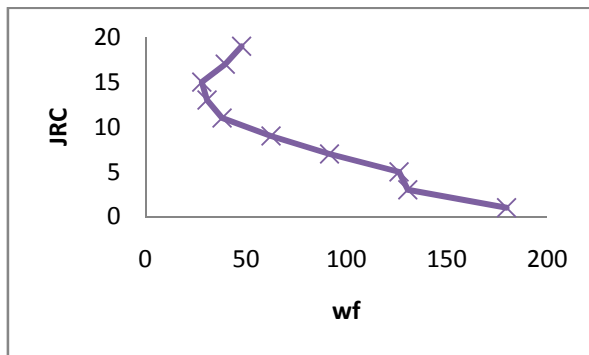
$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i^2} \quad (2)$$



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۱. الف) مقادیر استاندارد شده پارامترهای RMS, CLA و ACF، ب) مقادیر استاندارد شده پارامترهای Z₂, SF, RL، و ج) پارامتر موجداری برای پروفیل‌های استاندارد بارتون.

۳-۱. اثر هندسه پروفیل درز بر پارامترهای زیری

در بخش قبل نتایج پارامترهای مختلف کمی‌سازی آماری برای پروفیل‌های بارتون ارائه شد. با توجه به نتایج ارائه شده می‌توان ارتباط‌هایی را بین پارامترهای مختلف و JRC دریافت نمود. ولیکن نمی‌توان عملکرد پارامترهای مختلف را در قبال ویژگی‌های مختلف پروفیل بررسی نمود. به منظور بررسی عملکرد پارامترهای مختلف در برابر تغییر ویژگی‌های هندسی

تابع همبستگی (ACF): این پارامتر ارتباط مقادیر داده را در یک نقطه با مقادیر آن داده در نقاط دیگر بیان می‌کند (Aydan et al., 1996):

$$ACF = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^{N-1} y_i y_{i+1} \Delta x \quad (3)$$

که در آن Δx فاصله برداشت نقاط است.

تابع ساختاری (SF):

$$SF = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^{N-1} (y_{i+1} - y_i)^2 \Delta x \quad (4)$$

پارامتر زبری درز (RL): این پارامتر بیانگر نسبت طول واقعی پروفیل به طول اسمی آن است (Aydan et al., 1996, Tse; Curden, 1979 and):

$$RL = \frac{L_0}{L} = \frac{\sum_{i=1}^{N-1} \sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2}}{L} \quad (5)$$

در این رابطه x_i مختصات طولی آیین نقطه است.

$$Z_2 = \sqrt{\frac{1}{L} \sum_{i=1}^{N-1} \frac{(y_{i+1} - y_i)^2}{x_{i+1} - x_i}} \quad (6)$$

موجداری پروفیل: (Gadelmawla et al., 2002)

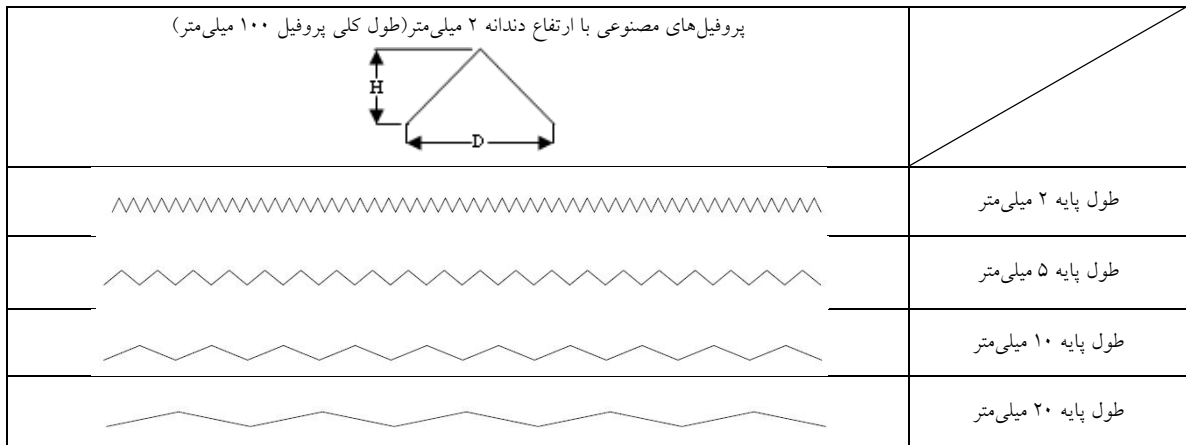
$$W_f = \frac{L \times RL}{CLA} \quad (7)$$

۳. تجزیه و تحلیل

به منظور بررسی پارامترهای آماری معرفی شده، پروفیل‌های دهگانه بارتون در فواصل ۰/۵ میلی‌متر رقومی‌سازی شده و کلیه پارامترهای فوق برای هر پروفیل محاسبه شده و نتایج در شکل ۱ ارائه شده است. همان‌گونه که در شکل مشخص است، پارامترهای CLA, RMS و ACF با افزایش JRC افزایش می‌یابند (تا JRC=۱۴). پارامترهای Z₂, SF, RL نیز به طور خطی افزایش یافته و W_f با افزایش JRC کاهش می‌یابد. هر یک از مجموعه پارامترهای ارتفاعی و زاویه‌ای دارای روند مشابهی هستند. در پروفیل‌های بارتون، ارتفاع دندانها با افزایش JRC تا ۱۴ افزایش یافته و در دو پروفیل آخر ارتفاع دندانها کوچک‌تر شده است. همچنین با افزایش JRC موجداری پروفیل‌های بارتون کاهش می‌یابد.

درز، اثر هندسه درز با استفاده از پروفیل‌هایی با هندسه منظم مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای بررسی ویژگی‌های پارامترهای زبری درز، چندین پروفیل مصنوعی با هندسه منظم ایجاد شده و پس از رقوم‌سازی هریک از آن‌ها، پارامترهای مورد مطالعه محاسبه شد. تغییرات دامنه درز (ارتفاع دندان‌ها) و تغییرات فرکانس دندان‌های درز مورد بررسی قرار گرفت. برای بررسی تغییرات ارتفاع درز، پروفیل‌هایی با ارتفاع دندان‌های (H) ۲، ۵ و ۱۰ میلی‌متر و طول پایه (D) ۲، ۵، ۱۰ و ۲۰ میلی‌متر ایجاد شد. به عنوان مثال هندسه پروفیل‌های با ارتفاع دندان ۲ میلی‌متر در شکل ۲ ارائه شده است. پروفیل‌های مورد بررسی در فواصل ۰/۱ میلی‌متر

رقومی‌سازی شدند. مقادیر پارامترهای زبری پروفیل‌های مورد بررسی در جدول ۱ ارائه شده است. با مقایسه نتایج پروفیل‌های مختلف مشاهده می‌شود که پارامترهای CLA، RMS و ACF تغییر ارتفاع دندان‌ها را تشخیص داده، لیکن قادر به تشخیص فرکانس دندان‌ها نمی‌باشند. براین اساس در پروفیل‌های با ارتفاع دندان ثابت، تغییر طول پایه دندان‌ها تأثیری بر این پارامترها نداشته و در پروفیل‌های با طول پایه ثابت دندان، با افزایش ارتفاع دندان، این پارامترها نیز افزایش می‌یابند. پارامترهای Z_2 ، SF، RL و W_f قادر به تشخیص ارتفاع دندان و فرکانس دندان‌ها هستند.



شکل ۲. هندسه پروفیل‌های با ارتفاع ۲ میلی‌متر و طول پایه‌های مختلف

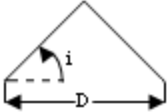




جدول ۱. مقادیر پارامترهای مختلف برای درزهای با ارتفاع Hx و طول پایه Dx

(برای مثال H2-D10 بیانگر پروفیلی با دندان‌های به ارتفاع ۲ میلی‌متر و طول پایه ۱۰ میلی‌متر است)

پروفیل	پارامتر	CLA	RMS	ACF	Z_2	RL	SF	W_f
H2-D2	۱	۱/۱۵۷	۱/۳۲	۲	۲/۲۳	۰/۰۴	۲۲۳/۶	
H2-D5	۱	۱/۱۵۵	۱/۳۳۱	۰/۸	۱/۲۸	۰/۰۰۶۴	۱۲۸/۰۶	
H2-D10	۱	۱/۱۵۵	۱/۳۳۲	۰/۴	۱/۰۸	۰/۰۰۱۶	۱۰۷/۷	
H2-D20	۱	۱/۱۵۵	۱/۳۳۲	۰/۲	۱/۰۲	۰/۰۰۰۴	۱۰۱/۹۸	
H5-D2	۲/۵	۲/۸۹	۸/۳۱۵	۵	۵/۱	۰/۲۵	۲۰۳/۹۶	
H5-D5	۲/۵	۲/۸۸۸	۸/۳۲	۲	۲/۲۳	۰/۰۴	۸۹/۴۴	
H5-D10	۲/۵	۲/۸۸۷	۸/۳۳	۱	۱/۴۱	۰/۰۱	۵۶/۵۷	
H5-D20	۲/۵	۲/۸۸۶	۸/۳۳۲	۰/۵	۱/۱۹	۰/۰۰۲۵	۴۴/۷۲	
H10-D2	۵	۵/۷۸۸	۳۳/۲۵	۱۰	۱۰/۰۵	۱	۲۰۰/۹۹	
H10-D5	۵	۵/۷۷۶	۳۳/۲۸	۴	۴/۱۲	۰/۱۶	۸۲/۴۶	
H10-D10	۵	۵/۷۷۴	۳۳/۳۲	۲	۲/۲۳	۰/۰۴	۴۴/۷۲	
H10-D20	۵	۵/۷۷۳	۳۳/۳۳	۱	۱/۴۱	۰/۰۱	۲۸/۲۸	

نتایج ارائه شده بیانگر آن است که در صورت مساوی بودن زوایه دندانها، پارامترهای زبری (Z_2 , RL , SF) فارغ از مقیاس دندانها مشابه خواهند بود. در پروفیل‌های مورد استفاده در بخش‌های قبل کلیه دندانهای یک پروفیل دارای ارتفاع یکسان می‌باشند. در این بخش پروفیل‌هایی با هندسه متفاوت که دارای زوایه دندان مساوی و توزیع‌های مختلفی از ارتفاع دندان می‌باشند، ساخته شده (شکل ۴) و مقادیر پارامترهای آماری در پروفیل‌های ساخته شده مورد بررسی قرار گرفت. نتایج در جدول ۳ ارائه شده است.

یکی دیگر از پارامترهای مهم در هندسه درز، زاویه دندانها می‌باشد. به منظور بررسی عملکرد پارامترهای زبری درز در زوایای مختلف دندانها، پروفیل‌هایی با زوایای دندان ۲۰، ۴۰ و ۶۰ درجه و طول پایه‌های ۱۰، ۲۰، ۲۵ و ۵۰ میلی‌متر ایجاد شد. هندسه پروفیل‌های با زاویه دندان ۲۰ درجه در شکل ۳ ارائه شده است. مقادیر پارامترهای مختلف توصیف کننده درز، در جدول ۲ ارائه شده است. با مقایسه نتایج مشخص می‌شود که در صورتی که زاویه دندانها مساوی باشد، پارامترهای Z_2 , SF و RL نتایج مشابهی را برای پروفیل‌های با فرکانس‌های مختلف (طول پایه‌های متفاوت) ارائه می‌نمایند.

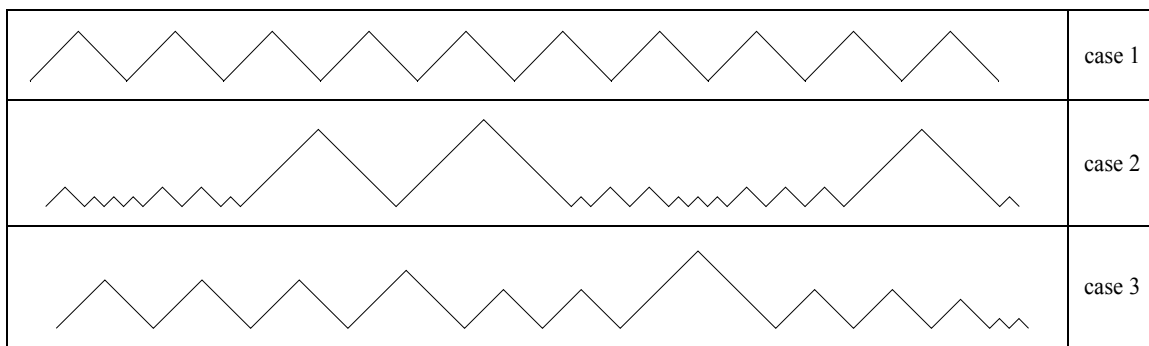
پروفیل‌های مصنوعی با زاویه دندان ۲۰ درجه (طول کلی پروفیل ۱۰۰ میلی‌متر)	
	
	طول پایه ۱۰ میلی‌متر
	طول پایه ۲۰ میلی‌متر
	طول پایه ۲۵ میلی‌متر
	طول پایه ۵۰ میلی‌متر

شکل ۳. هندسه پروفیل‌های با زاویه دندان ۲۰ درجه و طول پایه‌های مختلف

جدول ۲. مقادیر پارامترهای مختلف برای درزهای با زاویه I_x و طول پایه D_x

(برای مثال I40-D25 بیانگر پروفیلی با زاویه دندان معادل ۴۰ درجه و طول پایه معادل ۲۵ میلی‌متر است).

پارامتر							پروفیل
W_f	SF	RL	Z_2	ACF	RMS	CLA	
۱۱۹/۹۵	۰/۰۰۱۳	۱/۰۶۴	۰/۳۶۴	۱/۱۰	۱/۰۵	۰/۹۱	I20-D10
۵۸/۴۷	۰/۰۰۱۳	۱/۰۶۴	۰/۳۶۴	۴/۴۱	۲/۱۰	۱/۸۲	I20-D20
۴۶/۷۸	۰/۰۰۱۳	۱/۰۶۴	۰/۳۶۴	۶/۹	۲/۶۳	۲/۲۷	I20-D25
۲۳/۳۹	۰/۰۰۱۳	۱/۰۶۴	۰/۳۶۴	۲۷/۶	۵/۲۵	۴/۵۵	I20-D50
۶۲/۲۳	۰/۰۰۰۷	۱/۳۰۵	۰/۸۳۹	۵/۸۶	۲/۴۲	۲/۰۹۸	I40-D10
۳۱/۱۱	۰/۰۰۰۷	۱/۳۰۵	۰/۸۳۹	۲۳/۴۷	۴/۸۴	۴/۱۹	I40-D20
۲۴/۸۹	۰/۰۰۰۷	۱/۳۰۵	۰/۸۳۹	۳۶/۶۷	۶/۰۶	۵/۲۴	I40-D25
۱۲/۴۵	۰/۰۰۰۷	۱/۳۰۵	۰/۸۳۹	۱۴۶/۶۸	۱۲/۱۱	۱۰/۴۹	I40-D50
۴۶/۱۹	۰/۰۰۳	۲	۱/۷۳۲	۲۴/۹۹	۵	۴/۳۳	I60-D10
۲۳/۰۹	۰/۰۰۳	۲	۱/۷۳۲	۹۹/۹۹	۱۰	۸/۶۶	I60-D20
۱۸/۴۷	۰/۰۰۳	۲	۱/۷۳۲	۱۵۶/۲۴	۱۲/۵	۱۰/۸۲	I60-D25
۹/۲۴	۰/۰۰۳	۲	۱/۷۳۲	۶۲۴/۹۹	۲۵	۲۱/۶۵	I60-D50



شکل ۴. پروفیل‌های با هندسه‌های مختلف

توجه به نتایج فوق مشاهده می‌شود، در مواردی حتی استفاده از دو یا چند پارامتر نیز جهت تفکیک و تشخیص هندسه‌های مختلف مناسب نبوده و پارامترهای آماری کفایت لازم را جهت کمی‌سازی هندسه درز (پروفیل) نخواهند داشت.

۲-۳. نتایج روش‌های آماری در مورد پروفیل‌های واقعی به منظور بررسی نتایج روش‌های آماری در مورد پروفیل‌های طبیعی، دو پروفیل مورد استفاده قرار گرفته و تحت تنش‌های نرمال مختلف، آزمون‌های برشی انجام گرفت. در این بخش رابطه JRC به دست آمده از روش‌های آماری و JRC محاسبه شده از آزمون‌های برشی ارائه می‌شود.

۱-۲-۳. نمونه‌سازی و روش آزمایش به منظور تهیه نمونه‌های مشابه از پروفیل‌های طبیعی از مصالح سیمانی استفاده شد. طرح اختلاط و خصوصیات مصالح مورد استفاده در جدول ۴ ارائه شده است. پروفیل‌های طبیعی مورد استفاده در شکل ۵ ارائه شده‌اند. به منظور انجام آزمون‌های برشی نمونه‌هایی با ابعاد ۱۵×۱۰×۲۰ میلی‌متر (طول×عرض×ارتفاع) تهیه شد.

آزمون‌های برشی در تنش‌های نرمال ثابت معادل ۰/۵، ۱، ۲ و ۴ مگاپاسکال انجام شد. نمونه‌ها تا جابه‌جایی برشی معادل ۲۰ میلی‌متر و با سرعت ۰/۵ میلی‌متر در دقیقه مورد آزمایش برش قرار گرفتند.

با توجه به نتایج مشاهده می‌شود که در این پروفیل‌ها تنها پارامترهای RMS، ACF (که از پارامترهای ارتفاعی می‌باشند) متفاوت بوده و سایر پارامترها مقادیر مشابهی را ارائه می‌نمایند.

جدول ۳. مقادیر پارامترهای مختلف برای درزهای با هندسه

ارائه شده در شکل ۴

پارامتر پروفیل	CLA	RMS	ACF	Z ₂	RL	SF	W _f
case 1	۲/۵	۲/۸۹	۸/۳۳	۱	۱/۴۱	۰/۰۱	۵۶/۸۷
case 2	۲/۵	۳/۴۹	۱۲/۱۷	۱	۱/۴۱	۰/۰۱	۵۶/۸۷
case 3	۲/۵	۳/۰۴	۹/۲۵	۱	۱/۴۱	۰/۰۱	۵۶/۸۷

در مراجع روابطی جهت مرتبط نمودن پارامترهای Z₂، RL و SF با JRC ارائه شده است، که به طور مثال عبارتند از:

$$JRC = 32.2 + 32.47 \log(Z_2) \quad \text{Tse and Cruden (1979)} \quad (8)$$

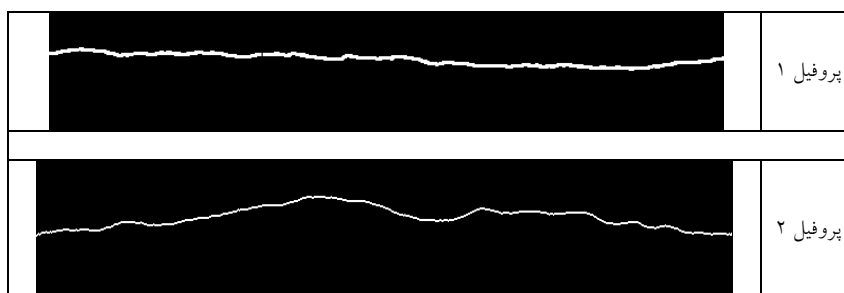
$$JRC = 92.07 \sqrt{(RL - 1)} - 3.28 \quad \text{Yu and Vayssade (1991)} \quad (9)$$

$$JRC = 37.63 + 16.5 \log(SF) \quad \text{Yang et al, (2001)} \quad (10)$$

با توجه به نتایج فوق و با استناد به روابط ارائه شده، پروفیل‌های فوق دارای JRC مشابه بوده و در معیار بارتون رفتار برشی این درزها مشابه خواهد بود. حال آنکه با توجه به شکل ۴ هندسه پروفیل‌های استفاده شده کاملاً متفاوت بوده و رفتارهای برشی متفاوتی از آن‌ها مورد انتظار است. لذا با

جدول ۴. طرح اختلاط و مشخصات مکانیکی مصالح مورد استفاده

وزن مخصوص (gr/cm ³)	مقاومت ۷ روزه (MPa)	روان کننده (%)	مصالح درشت دانه (Kg/m ³)	مصالح ریزدانه (Kg/m ³)	نسبت آب به سیمان	سیمان (Kg/m ³)
۲/۳۷	۵۰	۰/۴	۴۰۶	۵۹۶	۰/۳۵	۸۷۵



شکل ۵. پروفیل‌های طبیعی مورد استفاده

۳-۲-۲. نتایج آزمایش

در جدول ۵، نتایج JRC محاسبه شده از آزمون‌های برش، روش‌های آماری (معادلات ۸-۱۰) و مقایسه پروفیل‌های طبیعی و الگوهای بارتون ارائه شده است. مقادیر JRC حاصل از نتایج آزمون‌های برش با استفاده از رابطه زیر محاسبه شده است.

$$\tau = \sigma_n \tan \left[JRC \log \left(\frac{JCS}{\sigma_n} \right) + \varphi_b \right]$$

در این رابطه JCS مقاومت سطح درز، σ_n تنش نرمال، τ مقاومت برشی سطح درز و φ_b زاویه اصطکاک پایه است. با مقایسه مقادیر JRC تخمینی و JRC حاصل از آزمون‌های برش در جدول ۵، مشاهده می‌شود که مقادیر JRC تخمین زده شده از روش‌های آماری و الگوهای بارتون تا ۳۰٪ کمتر از مقادیر JRC محاسبه شده از آزمون‌های برش است.

۳-۲-۳. اثر فاصله برداشت نقاط

جهت کمی‌سازی زبری سطح درز نیاز است که سطح درز رقومی سازی شده و به مجموعه‌ای از مختصات (موسوم به ایر نقاط) تبدیل شود. این روش‌ها را می‌توان به روش‌های مکانیکی (تماسی) و نوری (غیر تماسی) تقسیم‌بندی نمود. امروزه عمدتاً از روش‌های نوری جهت برداشت نقاط سطح درز استفاده می‌شود.

روش‌های مکانیکی بر مبنای حرکت یک حسگر بر روی سطح درز و برداشت ارتفاع نقاط می‌باشد. در سیستم‌های مکانیکی،

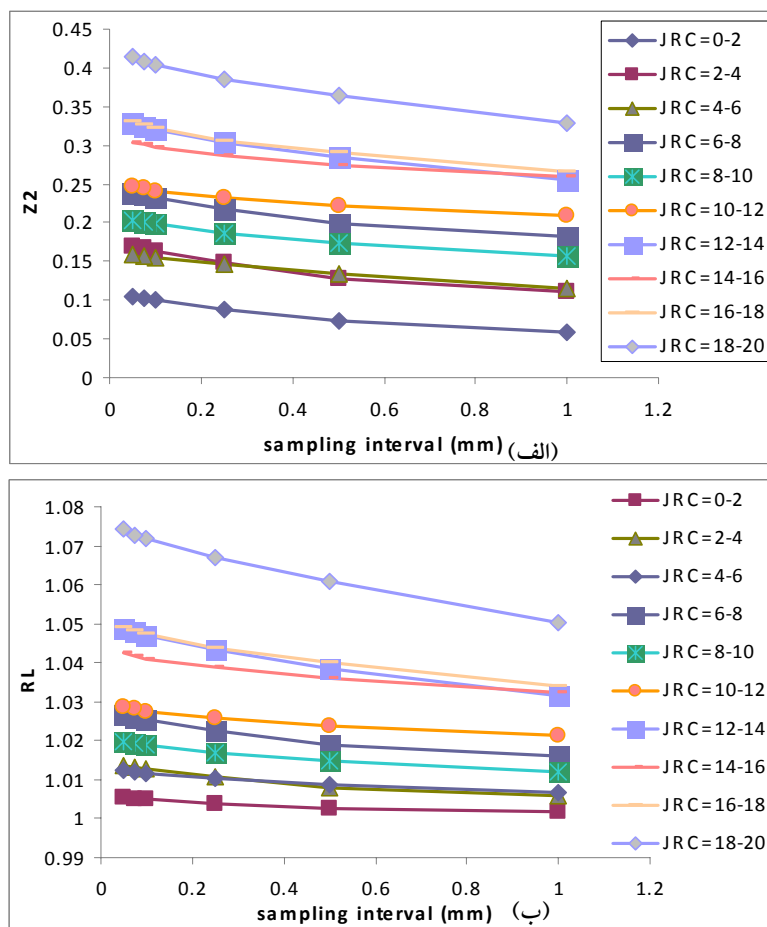
تفکیک‌پذیری و وضوح برداشت‌ها به شعاع نوک حسگر بستگی دارد. خطای دیگری که در این روش وجود دارد، بر اثر فشار روی سطح تماس ایجاد می‌شود که ممکن است موجب تغییر شکل موضعی رو به پایین یا آسیب سطح شود.

اصول روش‌های نوری شامل تابش نور یا باریکه‌ای از لیزر بر سطح درز و دریافت بازتابش آن توسط دوربین یا دوربین‌های تعبیه شده در دستگاه است. در نهایت با تجزیه و تحلیل تصاویر گرفته شده توسط دوربین‌ها، هندسه‌ای سه بعدی از سطح درز تهیه می‌شود.

در مجموع عمل برداشت مختصات نقاط توسط هر یک از روش‌های تماسی یا غیرتماسی در فواصل ثابت انجام می‌شود. لذا مقادیر پارامترهای آماری مورد بحث، متأثر از فاصله برداشت نقاط خواهند بود. این موضوع یکی از نقاط ضعف کمی‌سازی هندسه درز توسط پارامترهای آماری است. زیرا فاصله برداشت نقاط به عوامل مختلفی از جمله هندسه سطح درز و کانی‌های موجود در سطح درز بستگی دارد. اگر فاصله برداشت نقاط از نصف پریود پروفیل بزرگتر باشد، نتایج پارامترهای آماری صحیح نبوده و ویژگی‌های هندسی پروفیل به صورت صحیح محاسبه نخواهد شد. یکی دیگر از مواردی که فاصله برداشت نقاط و نتایج این عمل را تحت تأثیر قرار داده و موجب بروز خطا در نتایج برداشت‌ها می‌شود.

جدول ۵. نتایج JRC محاسبه شده از روش‌های مختلف

JRC (back-calculated)	الگوهای استاندارد بارتون	JRC(SF) (معادله ۱۰)	SF	JRC(RL) (معادله ۹)	RL	JRC(Z2) (معادله ۸)	Z ₂	شماره پروفیل
۱۲/۵	۱۰-۸	۸/۸۶	۰/۰۱۸۰۵۳	۱۰/۸۵	۱/۰۲۳۵۷۴	۱۰/۹۷	۰/۲۲۱۸۸۴	۱
۱۷/۹	۱۴-۱۶	۱۳/۳۵	۰/۰۳۳۷۴۶	۱۵/۱۶	۱/۰۴۰۱۳۲	۱۵/۶	۰/۳۰۸۲۳۱	۲



شکل ۶. مقادیر محاسبه شده Z_2 و RL در فاصله برداشتهای مختلف.

۴. بحث و بررسی

رفتار ناپیوستگی‌ها به وسیله فاکتورهای مختلفی از جمله زبری، ضخامت مواد پرکننده و مواد گوژی، شرایط هوازدگی سطح و رطوبت کنترل می‌شود. در درزهای کاملاً منطبق (matched)، زبری سطح، فاکتوری اساسی در تعیین مقاومت برشی است. به منظور کمی‌سازی مقاومت برشی ناپیوستگی، درک مناسبی از اثر زبری سطح مورد نیاز است. در این راستا مطالعات متعددی انجام شده است. در حال حاضر پارامتر JRC در تشریح مقاومت درز به کار می‌رود. با توجه به روش تعیین JRC و کیفی بودن این پارامتر، تعیین مقاومت ناپیوستگی، مستعد خطاهای قابل توجهی است. با توجه به این مساله روش‌های مختلفی برای کمی‌سازی زبری سطح درز توسعه یافته است. یکی از پر استفاده‌ترین و معتبرترین روش‌های کمی‌سازی سطح درز، استفاده از پارامترهای آماری است. در این روش، زبری توسط

وجود سنگ‌های حاوی کریستال‌های کوارتز یا کریستال‌هایی با خاصیت انکسار نور در نمونه مورد بررسی است. وجود این کریستال‌ها نتایج برداشت‌ها را تحت تأثیر قرار داده و موجب کاهش دقت اندازه‌گیری می‌شود. در این نوع سنگ‌ها باید فاصله برداشت نقاط را کاهش داد.

به منظور بررسی اثر فاصله برداشت نقاط بر نتایج تعیین زبری پروفیل، پروفیل‌های بارتون در فواصل ۱، ۰/۵، ۰/۲۵، ۰/۱، ۰/۰۷۵ و ۰/۰۵ میلی‌متر رقوم‌سازی شده و پارامترهای Z_2 و RL محاسبه شده و نتایج در شکل ۶ ارائه شده است.

با توجه به تصاویر، مشاهده می‌شود که با افزایش فاصله برداشت نقاط، مقادیر Z_2 و RL کاهش یافته که این موضوع بدان معناست که با افزایش فاصله برداشت نقاط، مقادیر زبری محاسبه شده کوچک‌تر خواهد بود. با توجه به شکل ۶-ب مشاهده می‌شود که با افزایش JRC درز میزان کاهش زبری محاسبه شده بیشتر می‌شود.

هستند، بحث برانگیز می‌باشد. چون اکثر پروفیل‌های درز که در مقیاس آزمایشگاهی اندازه‌گیری می‌شوند، *non-stationary* می‌باشند، *JRC* و پارامترهای آماری صلاحیت و قابلیت ضبط و تعیین *stationarity* زبری سطح را ندارند. *JRC* نه تنها از درزه‌ای به درزه دیگر تغییر می‌کند، بلکه برحسب مقیاس نیز تغییر می‌نماید. لذا نیاز است پارامترهای مستقل از مقیاس جهت کمی‌سازی زبری درز استفاده شوند. با استفاده از پروفیل‌های آماری نمی‌توان تغییرات جزئی را برداشت نمود و این پارامترها متوسط تغییرات پروفیل را بیان می‌کنند. با مقایسه *JRC* محاسبه شده از روش‌های آماری و *JRC* محاسبه شده از آزمون‌های برش، در پروفیل‌های طبیعی مشخص شد که روش‌های آماری، زبری‌های کوچک‌تری را تخمین می‌زنند. در معیار بارتون مقاومت برشی حداکثر، تابعی از تنش نرمال، مقاومت سطح درز و زاویه اصطکاک باقیمانده است. در مقیاس میکرو، مقاومت برشی به مقیاس دندان‌ها، زاویه دندان‌ها، مقاومت آن‌ها و میزان جابه‌جایی برشی بستگی دارد. مقاومت برشی بسیج شده توسط لغزش بین دندان‌ها و یا شکست دندان‌ها به دست می‌آید. لذا زبری بسیج شده را می‌توان توسط دو مؤلفه هندسی (برای بیان مؤلفه لغزش بین دندان‌ها) و مکانیکی (برای بیان مؤلفه شکست دندان‌ها) بیان نمود. براساس تنش نرمال اعمالی، این دو مؤلفه تعامل و برهم کنش خواهند داشت. لذا مقاومت برشی حداکثر نتیجه مؤلفه‌های مکانیکی و هندسی زبری درز است. با افزایش تنش نرمال و در اثر افزایش تعداد نقاط تماس و سطح تماس، مقاومت برشی درزه افزایش می‌یابد. در درزه‌های زبر، سطح تماس همسان با افزایش تنش نرمال افزایش نیافته و این بدان معناست که زبری بسیج شده تابعی خطی از تنش نرمال نیست. این اثر را نمی‌توان به طور کامل و دقیق در معادلات تخمینی (معادلات ۸ تا ۱۰) لحاظ نمود. زیرا این معادلات تنها براساس مؤلفه هندسی بوده و لذا مقادیر کوچک‌تری برای زبری درز ارائه می‌کنند.

با توجه به نتایج بررسی انجام شده در این تحقیق، نتیجه می‌شود که نمی‌توان زبری را با استفاده از یک یا تعداد معدودی مقادیر آماری بیان نمود. از سویی پارامترهای آماری

پارامترهای مختلفی مانند *CLA*، *RMS*، *Z₂*، *SF*، *RL* و ... تعیین می‌شود. برخی از پارامترهای فوق بر مبنای اندازه‌گیری‌های مشابه بوده و با یکدیگر مرتبط هستند. به عنوان مثال *CLA* و *RMS* و *ACF* و *Z₂* و *RL* و *SF* با یکدیگر ارتباط داشته و روند مشابهی را دارا می‌باشند.

پارامتر *CLA* تشریح مناسبی از تغییرات کلی ارتفاع پروفیل ارائه می‌نماید. این پارامتر اطلاعاتی در مورد طول موج نداده و به تغییرات کوچک در پروفیل حساس نمی‌باشد. پارامتر *RMS* در برابر تغییرات پروفیل حساس‌تر از *CLA* است. پارامتر *ACF* اطلاعات مهمی را در مورد رابطه مشخصات طول موجی و دامنه‌ای پروفیل ارائه می‌نماید.

پروفیل درزه‌ها ترکیبی از دو بخش ایستا (*stationary*) و پویا (*non-stationary*) است. در سری‌های ریاضیاتی، فرآیند *stationary*، یک فرآیند اتفاقی است که توزیع احتمال توأم، با انتقال در زمان یا فضا تغییر نمی‌کند. در این سری‌ها پارامترهایی نظیر متوسط و واریانس، در صورت وجود، بر حسب زمان یا مکان تغییر نمی‌کنند. به عنوان مثال، نویز سفید *stationary* است. در صورتی که صدای حاصل از یک سنج، اگر یک ضربه زده شود، *stationary* نمی‌باشد، چون توان صوتی ضربه (بنابراین واریانس آن) برحسب زمان کاهش می‌یابد. پروفیل‌های *stationary* دارای خصوصیات ذیل می‌باشند:

۱- صفحه متوسط (متوسط ارتفاعی) در موقعیت‌های مکانی مختلف ثابت است. ۲- واریانس ارتفاعی سطح برحسب مکان ثابت می‌ماند. و ۳- تابع کوواریانس ارتفاع، تنها به *lag distance* وابسته بوده و به موقعیت مکانی ارتباط ندارد. پروفیل‌هایی که حداقل یکی از شرایط فوق را تأمین نمی‌کنند *non-stationary* هستند.

در میان پارامترهای آماری، پارامتر *Z₂* مهم‌ترین و پرستفاده‌ترین فاکتور است. لیکن این پارامتر در مورد پروفیل‌های *stationary* مفید بوده و در مورد پروفیل‌های *non-stationary* کارایی لازم را نخواهد داشت. لذا استفاده از یک پارامتر آماری *stationary* برای تعیین پروفیل درزه‌های طبیعی که ترکیبی از دو بخش *stationary* و *non-stationary*

به فاصله برداشت نقاط حساس بوده و با تغییر فاصله نقاط مقادیر زبری متفاوتی حاصل می‌شود.

۵. نتیجه‌گیری

در این مطالعه پارامترهای آماری توصیف کننده پروفیل درز مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور از پروفیل‌های بارتون، پروفیل‌هایی با هندسه‌های منظم و پروفیل‌های طبیعی استفاده شد. نتایج حاصل از مطالعه انجام شده عبارتند از:

۱- در مطالعات گذشته عموماً جهت تعیین زبری از یک پارامتر استفاده شده است. براساس مطالعه انجام شده مشخص شد استفاده از یک پارامتر برای تفکیک هندسه‌های مختلف، صحیح نبوده و حتی در مواقعی نیز نمی‌توان با استفاده از چند پارامتر، هندسه‌های مختلف را تفکیک و مقایسه نمود.

۲- فاصله برداشت نقاط در مطالعات هندسه درز، مهم بوده و با افزایش فاصله برداشت نقاط، مقادیر زبری محاسبه شده نسبت به زبری واقعی کاهش می‌یابد. میزان این کاهش با افزایش زبری افزایش می‌یابد.

۳- مقادیر زبری محاسبه شده از روش‌های آماری کوچک‌تر از مقادیر زبری محاسبه شده از نتایج تست‌های برشی می‌باشد. زیرا پارامتر زبری بسیج شده ترکیبی از مؤلفه‌های هندسی و مکانیکی می‌باشد. لذا استفاده از روش‌های مبتنی بر مؤلفه هندسی موجب تخمین زبری‌های کوچک‌تر برای درز خواهد شد.

هرچند پارامترهای آماری در طراحی‌های اولیه مناسب به نظر می‌آیند لیکن در مطالعات دقیق هندسه درز و رفتار ناپیوستگی‌ها نیاز است روش‌های دیگر مورد استفاده قرار گیرد.

منابع

- Aydan, Ö., Shimizu, Y., and Kawamoto, T., 1996. The anisotropy of surface morphology characteristics of rock discontinuities. *Rock Mech. Rock Eng.*, 29(1): 47-59.
- Barton, N., chouby, V., 1977. The shear strength of rock joints in theory and practice. *Rock Mechanics*, 10: 1-65.
- Dove, J.E., Frost, J.D., 1996. A method for measuring geomembrane surface roughness. *Geosynthetics International*, 3: 369-392.
- Gadelmawla, E.S., Koura, M.M., MAksoud, T.M.A., Elewa, I.M., Soliman, H.H., 2002. Roughness Parameters *J. Mat. Proc. Tech.*, pp. 133-145.
- Gokhale, A.M., Drury, W.J., 1990. A general method for estimation of fracture surface roughness: Part II Theoretical aspects. *Metallurgical Transactions A*, 21A: 1193-1199.
- Hong, E.S., Lee, J.S., Lee I.M., 2008. Underestimation of roughness in rough rock joints. *Int. J. Num. and Ana. Meth. In Geomech.*, 32: 1385-1403.
- Lee, S.W., Frost, J.D., Righter, G.K., 1998. The influence of geomembrane surface roughness on geomembrane-geotextile interface strength. *Proceedings of Sixth International Conference on Geosynthetics, Atlanta, Georgia*, pp.433-438.
- Maerz, N.H., Franklin, J.A., Bennett, C.P., 1990. Joint roughness measurement using shadow profilometry. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr.*, 27: 329-343.
- Myers, M.o., 1962. Characterization of surface roughness. *Wear*, 5: 182-189.
- Sayles, R.S., Thomas, T.R., 1977. The Spatial representation of surface roughness by means of the structure function: Practical alternative to correlation. *Wear*, 42: 263-276.
- Tse, R., Cruden, D.M., 1979. Estimating joint roughness coefficients. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, 16: 303-307.
- Yu, X., Vayssade, B., 1991. Joint profiles and their roughness parameters. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, 28: 333-336.
- Yang, Z.Y., Lo, S.C., Di, C.C., 2001. Reassessing the joint roughness coefficient (JRC) estimation using Z_2 . *Rock Mech. Rock Engng.*, 34(3): 243-251.