ارائه روابط تجربی به‌منظور محاسبهٔ مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته سنگ‌های سخت با استفاده از نتایج چکش اشمیت

*غلامرضا خانلری: دانشگاه بوعلی‌سینا همدان، گروه زمین‌شناسی
داود فریدونی: دانشگاه آزاد اسلامی واحد همدان، گروه مهندسی عمران

تاریخ: دریافت ۸۸/۸/٦ **پذیرش** ۹۰/۱۲/۱۳

چکیده

از چکش اشمیت به‌منظور محاسبهٔ مقاومت فشاری دیوارهٔ درزه‌ها (JCS) و مدول الاستیسیته سنگ‌ها، در بسیاری از پروژه‌های مهندسی استفاده می‌شود. استفاده از این ابزار، به‌عنوان روشی سریع، ارزان و غیرمخرب تلقی شده و از این رو مزیت به‌حساب می‌آید. در این زمینه پس از استفاده از چکش اشمیت و ثبت عدد بازگشتی از روی آن، محققان مختلف و از جمله بارتون و کوبی، دییر، کیدبینزکی، آفموت و ISRM برای محاسبهٔ پارامترهای مذکور روابط تجربی متعددی ارائه کرده‌اند که در این مقاله به بررسی و تحلیل این روابط می‌پردازیم. با توجه به اهمیت این موضوع در این پژوهش روابط تجربی جدیدی برای محاسبهٔ این پارامترها ارائه شده است که کاربرد آن‌ها برای سنگ‌های سخت نتایج بسیار خوبی را نشان می‌دهد. لازم به توضیح است که این روابط با استفاده از ۸۲۷ مورد از نتایج واجهش به‌وسیلهٔ چکش اشمیت بر روی سطوح درزهٔ تودهٔ سنگ‌های سخت نظیر گرانیت، دیوریت و هورنفلس صورت پذیرفته است که در حاشیهٔ جاده گنج‌نامه-شهرستانه واقع در جنوب غرب شهرستان همدان قرار دارند.

واژه‌های کلیدی: سنگ‌های سخت، چکش اشمیت، مقاومت فشاری درزه، مدول الاستیسیته.

*نویسنده مسئول khanlari_reza@yahoo.com

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1390.5.1.5.0]

مقدمه

مقاومت فشاری تک‌محوری و مدول الاستیسته از مهم‌ترین خواص مهندسی سنگ‌ها هستند که در طراحی پروژه‌های سطحی و زیرزمینی در توده‌های سنگی به‌طور گسترده‌ای استفاده می‌شوند. البته چگونگی و روش تعیین این پارامترها در استانداردهای (ASTM1984) و (ISRM 1981) ارائه شده است [۹]، [۱٤]. استفاده از چکش اشمیت[۱] و اسکلرسکوپ شور[۲] یکی از روش‌های غیرمستقیم تعیین مقاومت فشاری سنگ‌ها است. استفاده از این وسایل علاوه بر اندازه‌گیری سختی بازگشتی سنگ‌ها، امکان دست‌یابی به مقاومت فشاری تک‌محوری و مدول الاستیسیته سنگ را مهیا می‌سازد [۱۰]. چکش اشمیت اولین بار در اواخر دهۀ ۱۹٤۰ به‌عنوان روشی غیرمخرب برای تعیین مقاومت بتن به‌کار گرفته شد [۵]. برای اولین بار در سال ۱۹٤۸ مهندسی سوئیسی به‌نام ارنست اشمیت[۳] استفاده از چکش اشمیت را پیشنهاد داد و به‌همین دلیل، اکنون به‌نام آزمایش چکش اشمیت شناخته می‌شود. این وسیله در اوایل دهۀ ۱۹٦۰ در مکانیک سنگ برای تعیین مقاومت فشاری تک‌محوری و مدول الاستیسیته مصالح سنگی استفاده شد [۵]، [٦]، [۱۱]. هم‌چنین امروزه برای تعیین مقاومت فشاری سطوح درزۀ طبیعی[٤] (JCS) از چکش اشمیت بطور گسترده‌ای استفاده می‌گردد.

بر حسب مکانیزم عملکرد و مقدار انرژی حاصل از هر یک از انواع چکش‌ها، دو نوع مختلف از چکش اشمیت وجود دارد که به نام تیپ‌های L و N معروف می‌باشند. انرژی مؤثر چکش اشمیت تیپ L برابر ۰/۷۳۵ نیوتن متر می‌باشد که فقط یک سوم انرژی تأثیر چکش تیپ N که دارای انرژی تأثیر ۲/۲۰۷ نیوتن متر است [۹]. لازم به ذکر است که (ISRM 1978) در تعیین مقاومت فشاری سنگ‌ها، بر استفاده از چکش تیپ L تأکید دارد، اما (ASTM 2001) تأکیدی بر نوع چکش ندارد [۵].

چکش اشمیت دارای میله‌ای فولادی است که در تماس با سطح سنگ یا سطح درزه قرار داده می‌شود. در داخل چکش وزنه‌ای وجود دارد که با مقدار انرژی معینی بر میلۀ فولادی

۱. Schmidt Hammer ۲. Shore Sclerroscope ۳. Schmidt E
٤. Joint Compressive Strength

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1390.5.1.5.0]

ضربه می‌زند (شکل ۱). در واقع مکانیسم عمل چکش اشمیت استوار بر ضربه زدن میلهٔ فولادی بر روی سطح درزه و بازگشت آن و قرائت عدد مربوطه از روی شاخص چکش است. مقدار عدد قرائت شده در این آزمایش متناسب با سختی سطحی است که میلهٔ فولادی چکش با آن برخورد می‌کند.

عدد بازگشتی را می‌توان با منحنی کالیبرهٔ موجود بر روی چکش به مقاومت فشاری سنگ ارتباط داد. منحنی کالیبره برای مقاومت فشاری در این روش دارای حساسیت بسیار زیادی است و تحت تأثیر عوامل متعددی از جمله نوع سنگ، وزن واحد حجم، میزان تخلخل، درصد رطوبت، درجهٔ هوازدگی و امتداد قرارگیری چکش نسبت به سطح سنگ به‌هنگام انجام آزمایش و استفاده از چکش اشمیت است [۱].



شکل ۱. نحوهٔ استفاده از چکش اشمیت

هنگام استفاده از چکش اشمیت بر روی سطوح درزه سنگ، برای هر نمونه حداقل باید ۲۰ قرائت از واجهش اشمیت انجام شود، سپس نیمی از داده‌ها که دارای کم‌ترین مقدار هستند، حذف شده و از بقیه میانگین‌گیری به‌عمل آید [٤]. از آن‌جا که راستا و نحوهٔ به‌کارگیری

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1390.5.1.5.0]

چکش اشمیت بر روی عدد بازگشتی مؤثر است، بنا بر این باید نتایج با توجه به راستای استفاده از چکش مطابق جدول ۱ تصحیح گردند. برای این منظور، مقادیری که در جدول دارای علامت مثبت هستند به مقدار میانگین عدد بازگشتی اضافه شده و مقادیر دارای علامت منفی از مقدار میانگین کسر می‌گردند [۳]. اگر زاویهٔ قرارگیری چکش نسبت به سطح افق صفر باشد، یعنی چکش افقی استفاده شود، نیاز به تصحیح عدد بازگشتی نیست. همچنین در صورتی که عدد واجهش محاسبه شده مضربی از عدد ۱۰ نباشد، باید از درون‌یابی برای محاسبه مقدار تصحیح، استفاده کرد.

جدول ۱. تصحیح سختی اشمیت برای واجهش‌های غیرافقی

تعداد واجهش (R)	مقدار تصحیح برای زاویهٔ انحراف			
	به سمت بالا		به سمت پایین	
	+۹۰	+٤٥	-٤٥	-۹۰
۱۰	-	-	+۲/٤	+۳/۲
۲۰	-٥/٤	-۳/٥	+۲/٥	+۳/٤
۳۰	-٤/۷	-۳/۱	+۲/۳	+۳/۱
٤۰	-۳/۹	-۲/٦	+۲/۰	+۲/۷
٥۰	-۳/۱	-۲/۱	+۱/٦	+۲/۲
٦۰	-۲/۳	-۱/٦	+۱/۳	+۱/۷

مواد و روش‌ها

برای انجام این پژوهش با انجام بررسی‌های کتابخانه‌ای، اطلاعات موجود در رابطه با تودهٔ گرانیتی الوند و هالهٔ دگرگونی مجاورتی پیرامون آن واقع در استان همدان، جمع‌آوری گردید. سپس در طی بازدیدهای صحرایی، نمونه‌برداری برای تهیهٔ مقاطع نازک صورت گرفته و با تهیهٔ مقاطع نازک و انجام پژوهش‌های سنگ‌شناسی، مشخص گردید که بخش عمدهٔ تودهٔ پلوتونیک الوند را گرانیتوئیدها و سنگ‌های هاله دگرگونی که اکثراً از نوع هورنفلس‌های کوارتز-فلدسپاتی هستند، در بر گرفته‌اند. کاربرد چکش اشمیت بر روی سنگ‌های مذکور در چند ایستگاه مختلف منجر به کسب داده‌های صحرایی و عدد سختی بازگشتی اشمیت گردید. در مراحل بعد با نمونه‌برداری از سنگ‌های مذکور و تعیین وزن واحد حجم خشک و مقاومت

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1390.5.1.5.0]

فشاری تک‌محوری آن‌ها در آزمایشگاه، با انطباق منحنی‌هایی بر روی داده‌های حاصل، روابطی برای محاسبهٔ مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته سنگ‌های سخت ارائه گردید.

پیشینهٔ تحقیق

در مکانیک سنگ، کاربرد اصلی چکش اشمیت محاسبهٔ مقادیر مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته سنگ است که از طریق نمودارها و روابط تجربی قابل محاسبه است [۷]. در این باره محققان مختلف روابط تجربی متعددی را برای محاسبهٔ پارامترهای مذکور ارائه کرده‌اند که برخی از مهم‌ترین آن‌ها در ادامه معرفی گردیده‌اند. همچنین روابط پیشنهادی به‌وسیلهٔ سایر محققان در جدول ۲ ارائه شده است.

روابط دیر

دیر[۱] (۱۹۶۰) برای محاسبهٔ مقاومت فشاری و مدول الاستیسیتهٔ سنگ این روابط را ارائه کرد [۸]، [۱۳]:

$$\sigma_a = 6.9\times10^{[0.16+0.0078(H_s\times\gamma_a)]} \quad (۱)$$

$$E_t = 600.5\times(H_s.\gamma_a)-20.276 \quad (۲)$$

در این روابط H_s شاخص عدد سختی اشمیت، γ_a وزن واحد حجم خشک سنگ (gr/cm^3)، σ_a مقاومت تراکمی تک‌محوری (MPa) و E_t مدول الاستیسیته سنگ (GPa) می‌باشد. لازم به توضیح است که این رابطه برای سختی‌های بین ۰ تا ۶۰ کاربرد دارد.

رابطهٔ کیدیبینزکی[۲] (۱۹۸۰)

$$\sigma_a = 0.52e^{(0.05H_S+\gamma_a)} \quad (۳)$$

در این رابطه σ_a مقاومت تراکمی تک‌محوری (MPa)، e پایه لگاریتم نپرین، H_s شاخص میانگین عدد سختی اشمیت و γ_a وزن واحد حجم سنگ (gr/cm^3) است [۵].

رابطG پیشنهادی ISRM 1981

$$Log\sigma_c = 0.00014\gamma_a H_s + 3.16 \quad (٤)$$

۱. Deere ۲. Kidybinski

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1390.5.1.5.0]

در این رابطه σ_c مقاومت تراکمی تک‌محوری (Psi)، H_s عدد سختی بازگشتی اشمیت و γ وزن واحد حجم سنگ (gr/cm^3) است.

رابطه بارتون[۱] و کوبی[۲] (۱۹۷۷)

$$LogJCS = 0.00088\gamma_d R + 1.01 \quad (۵)$$

در این رابطه JCS مقاومت تراکمی تک‌محوری (MPa)، R عدد سختی بازگشتی اشمیت و γ_d وزن واحد حجم سنگ (KN/m^3) است[۱۲].

رابطهٔ آفموت[۳] (۱۹۷۳)

$$JCS = 0.33 \times (R \times \gamma)^{1.35} \quad (۶)$$

در این رابطه R شاخص عدد سختی اشمیت، γ وزن واحد حجم سنگ (gr/cm^3) و JCS مقاومت تراکمی تک‌محوری (MPa) سنگ است [۵].

لازم به توضیح است که روابط فوق همگی تجربی است و برای استفاده از آن‌ها باید دقت کرد که کدام رابطه برای استفاده در تعیین مقاومت تراکمی تک‌محوری سطوح درزه سنگ‌های مورد نظر مناسب‌تر است و انطباق بهتری با مقاومت تراکمی تک‌محوری سنگ دارد. در جدول ۲ برخی دیگر از مهم‌ترین روابط ارائه شده توسط محققان مختلف در ارتباط با عدد بازگشتی اشمیت، مقاومت فشاری تک‌محوری و مدول الاستیسیتهٔ سنگ‌ها ارائه شده است. در این جدول σ_{UCS} مقاومت تراکمی تک‌محوری (MPa)، E_t مدول الاستیسیتهٔ مماسی در ۵۰ درصد مقاومت تراکمی تک‌محوری، R_L و R_N به‌ترتیب اعداد بازگشتی حاصل از چکش‌های تیپ L و N، r ضریب رگرسیون روابط و ρ دانسیتهٔ سنگ (gr/cm^3) است. چنان‌که در جدول ۲ ملاحظه می‌شود، افراد مختلفی تلاش کرده‌اند روابط مختلفی را برای استفاده از داده‌های حاصل از چکش اشمیت ارائه کنند، که در همین راستا هدف این پژوهش نیز ارائه روابطی است که تاکنون کسی ارائه نکرده است و برای اولین بار معرفی می‌گردند، لذا پژوهش حاضر از این نقطه نظر حائز اهمیت است.

۱. Barton ۲. Choubey ۳. Aufmuth

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1390.5.1.5.0]

جدول ۲. معرفی برخی از مهمترین روابط ارائه شده توسط محققین مختلف در ارتباط با عدد بازگشتی اشمیت، مقاومت فشاری تک محوری و مدول الاستیسیته سنگ‌ها [۵]

References	Proposed correlations*	r	Validity range		
			Rock type	σ_{UCS}	R
Aufmuth (1973)	$\sigma_{UCS}=0.33*(R_L*\rho)^{1.35}$	0.80	25 different lithologies	12–362	10–54
	$E_t=4911.84*(R_L*\rho)^{1.06}$	0.75			
Kahraman (1996: in Yilmaz and Sendir, 2002)	$\sigma_{UCS}=0.00045*(R_N*\rho)^{2.46}$	0.96	10 different lithologies	–	–
Gokceoglu (1996: in Yilmaz and Sendir, 2002)	$\sigma_{UCS}=0.0001*R^{3.27}$	0.84	Marl	–	–
Yasar and Erdogan (2004)	$\sigma_{UCS}=0.000004*R_L^{4.29}$	0.89	Carbonates, sandstone, basalt	40–112	45–55
Dearman and Irfan (1978)	$\sigma_{UCS}=0.00016*R_L^{3.47}$	–	Granite	11–266	23–62
	$E_t=1.89*R_L-60.55$	0.93	(Grade I to IV)		
Xu et al. (1990)	$\sigma_{UCS}=2.98*e^{(0.06*R_L)}$	0.95	Mica-schist	9–56	17–53
	$E_t=1.77*e^{(0.07*R_L)}$	0.96			
	$\sigma_{UCS}=2.99*e^{(0.06*R_L)}$	0.91	Prasinite	8–145	21–64
	$E_t=2.71*e^{(0.04*R_L)}$	0.91			
	$\sigma_{UCS}=2.98*e^{(0.063*R_L)}$	0.94	Serpentinite	–	–
	$E_t=2.57*e^{(0.03*R_L)}$	0.88			
	$\sigma_{UCS}=3.78*e^{(0.05*R_L)}$	0.93	Gabro	–	–
	$E_t=1.75*e^{(0.05*R_L)}$	0.95			
	$\sigma_{UCS}=1.26*e^{(0.52*R_L*\rho)}$	0.92	Mudstone	–	–
	$E_t=0.07*e^{(0.31*R_L*\rho)}$	0.89			
Deere and Miller (1966)	$\sigma_{UCS}=9.97*e^{(0.02*R_L*\rho)}$	0.94	28 different lithologies	22–358	23–59
	$E_t=0.19*R_L*\rho^2-7.87$	0.88			
Beverly et al. (1979: in Xu et al., 1990)	$\sigma_{UCS}=12.74*e^{(0.02*R_L*\rho)}$		20 different lithologies	38–218	–
	$E_t=0.19*R_L*\rho^2-12.71$				
Cargill and Shakoor (1990)	$\sigma^{UCS}=3.32*e^{(0.04*R_L*\rho)}$	0.93	Sandstones		
	$\sigma_{UCS}=18.17*e^{(0.02*R_L*\rho)}$	0.98	Carbonates	35–271	27–49
Kahraman (2001)	$\sigma_{UCS}=6.97*e^{(0.01*R_N*\rho)}$	0.78	Carbonates	4–153	15–70
This study	$\sigma_{UCS}=1.45*e^{(0.07*R_L)}$	0.92	Granite	6–196	20–65
	$E_t=1.04*e^{(0.06*R_L)}$	0.91	(Grade I to IV)		23–76
	$\sigma_{UCS}=0.92*e^{(0.07*R_N)}$	0.94			
	$E_t=0.72*e^{(0.05*R_N)}$	0.92			
Yilmaz and Sendir (2002)	$\sigma_{UCS}=2.27*e^{(0.06*R_L)}$	0.91			
	$E_t=3.15*e^{(0.05*RL)}$	0.95	Gypsum	15–30	30–44
Katz et al. (2000)	$\sigma_{UCS}=2.21*e^{(0.07*R_N)}$	0.96	Limestone, sandstone	11–259	24–73
	$E_t=0.00013*R_N^{3.09}$	0.99	Syenite, granite		
Kidybinski (1980)	$\sigma_{UCS}=0.52*e^{(0.05*R+\rho)}$		Coal, shale, mudstone, siltstone, sandstone	–	–
Shorey et al. (1984)	$\sigma_{UCS}=0.40*R_N-3.60$	0.94	Coal	3–13	15–40
Haramy and DeMarco (1985)	$\sigma_{UCS}=0.99*R_L-0.38$	0.70	Coal	7–46	12–44
Ghose and Chakraborti (1986)	$\sigma_{UCS}=0.88*R_L-12.11$	0.87	Coal	13–41	28–53
Singh et al. (1983)	$\sigma_{UCS}=2.00*R_L$	0.86	Sandstone, siltstone, mudstone, seatearth	12–73	10–35
O' Rourke (1989)	$\sigma_{UCS}=4.85*R_L-76.18$	0.77	Sandstone, siltstone, limestone, anhydride	14–215	19–52
Sachpazis (1990)	$\sigma_{UCS}=4.29*R_L-67.52$	0.96	33 different carbonates	22–311	16–60
	$E_t=1.94*R_L-33.93$	0.88			
Tugrul and Zarif (1999)	$\sigma_{UCS}=8.36*R_L-416.00$	0.87	Granite	109–193	64–72

ارائهٔ روابط تجربی حاصل از این پژوهش

در این پژوهش، روابط تجربی جدیدی برای محاسبهٔ مقاومت فشاری دیوارهٔ درزه و مدول الاستیسیتهٔ سنگ ارائه شده است که این روابط حاصل استفاده از ۸۲۷ مورد از نتایج واجهش توسط چکش اشمیت تیپ N بر روی سطوح درزهٔ توده سنگ‌های سخت نظیر گرانیت،

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1390.5.1.5.0]

دیوریت و هورنفلس هستند. سنگ‌های آزمایش شده، تودهٔ پلوتونیک الوند و هالهٔ دگرگونی اطراف آن را شکیل می‌دهند. نتایج پژوهش‌های سنگ شناسی مشخص کرده است که بخش عمدهٔ تودهٔ پلوتونیک الوند را گرانیتوئیدها و به‌ویژه گرانیت‌های پورفیروئید (مونزو گرانیت- گرانودیوریت)، گرانیت‌های مزوکرات و گرانیت‌های هولولوکرات تشکیل داده‌اند و سنگ‌های هاله دگرگونی در اکثر مناطق از نوع هورنفلس‌های کوارتز- فلدسپاتی است [۲]. این سنگ‌ها در حاشیهٔ جاده گنج‌نامه- شهرستانه در جنوب غرب شهرستان همدان رخ‌نمون خوبی دارند و به‌همین دلیل برای انجام این پژوهش از این رخ‌نمون‌ها استفاده شده است.

به‌منظور ارائه این روابط، با به‌کارگیری چکش اشمیت بر روی سنگ‌های منطقه در صحرا و محاسبهٔ وزن واحد حجم خشک نمونه‌ها و مقاومت تراکمی آن‌ها در آزمایشگاه، از حاصل ضرب وزن واحد حجم سنگ‌ها در عدد بازگشتی اشمیت استفاده شده است. از آنجاکه سنگ‌های منطقه تقریباً سالم و بدون هوازدگی هستند، مقاومت تراکمی تک‌محوری برای هر سنگ معادل مقدار JCS در نظر گرفته شده است. پس از انجام آزمایش‌های صحرایی و آزمایشگاهی، داده‌های مذکور در دو دستگاه محور مختصات که در شکل‌های ۲ و ۳ ارائه شده‌اند، ترسیم گردیدند و نهایتاً روابط مورد نظر از آن‌ها استخراج شده‌اند. روابط حاصل از این پژوهش عبارتند از:

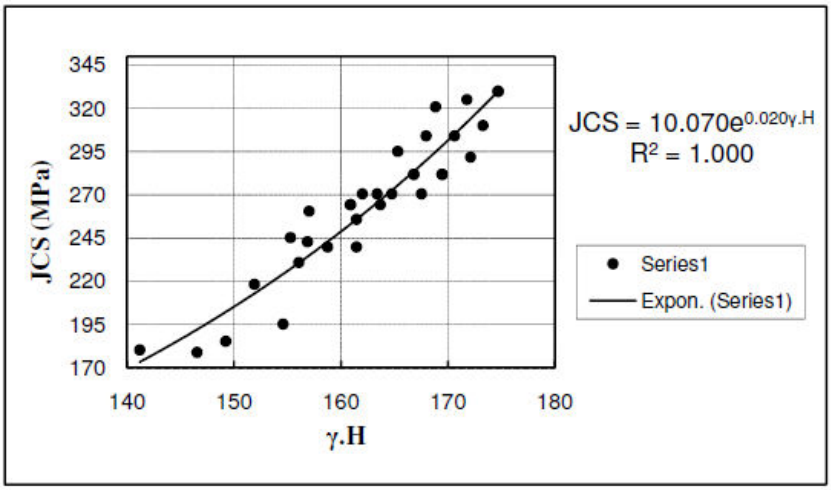
$$JCS = 10.070 \times e^{(0.020 H_S \times \gamma_a)} \quad (۷)$$

$$E = 34.912 \times e^{(0.0063 H_S \times \gamma_a)} \quad (۸)$$

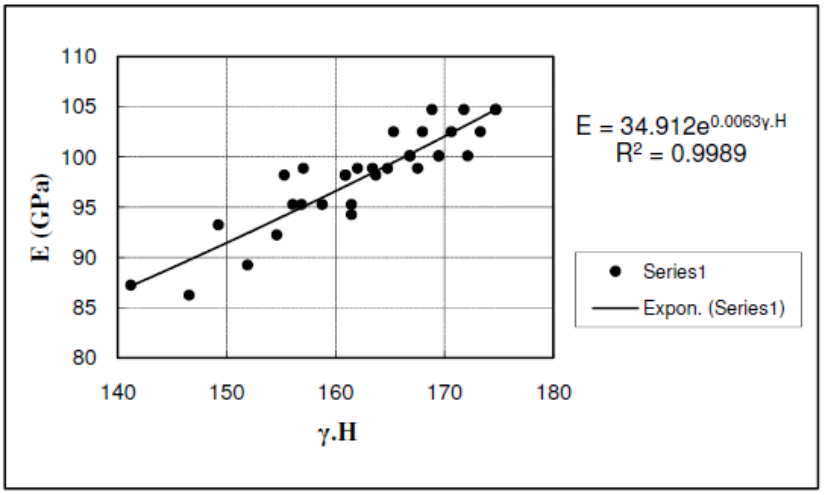
در این روابط JCS مقاومت فشاری سطح درزه (MPa)، e پایه لگاریتم نپرین، H_s شاخص میانگین عدد سختی اشمیت، γ_a وزن واحد حجم خشک سنگ (gr/cm^3) و E مدول الاستیسیته سنگ (GPa) است.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1390.5.1.5.0]



شکل ۲. نتایج حاصل از مقاومت فشاری دیوارهٔ درزه با حاصل‌ضرب وزن واحد حجم سنگ و عدد بازگشتی اشمیت



شکل ۳. نتایج حاصل از مدول الاستیسیتهٔ با حاصل‌ضرب وزن واحد حجم سنگ و عدد بازگشتی اشمیت

نتایج حاصل از کاربرد روابط این پژوهش برای چند منطقهٔ انتخابی از محل بررسی شده، به‌منظور مقایسه با روابط ارائه شده به‌وسیلهٔ بارتون و کوبی (۱۹۷۷) و دییر (۱۹۶۰) در جدول ۳ نشان داده شده‌اند.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1390.5.1.5.0]

جدول ۳. نتایج حاصل از کاربرد چکش اشمیت برای سنگ‌های چند ایستگاه انتخابی از منطقهٔ بررسی شده

ردیف	لیتولوژی	تعداد واجهش‌ها	میانگین سختی بازگشتی اشمیت	وزن واحد حجم خشک (gr/cm^3)	مقاومت فشاری سطح درزه (JCS) (MPa)			مدول الاستیسیته (E) (GPa)	
					حاصل از این پژوهش (رابطهٔ ۷)	بارتون و کوبی (۱۹۷۷)	دییر (۱۹۶۰)	حاصل از این پژوهش (رابطهٔ ۸)	دییر (۱۹۶۰)
۱	دیوریت	۱٤٦	٦۰	۲/۹۳	۳۲۹/۹۵	۳۲۹/٦۸	۳۳۰/۱۲	۱۰٤/۷۳	۱۰٤/۸۳
۲	گرانیت	۸٦	٦٤	۲/٦٦	۳۰٤/۱۱	۳۰٤/۰۲	۳۰٤/۲٤	۱۰۲/۵۲	۱۰۲/٤٤
۳	هورنفلس	۹۰	۵۸	۲/۸۰	۲٦٤/۲۹	۲٦٤/۸۷	۲٦٤/۷۸	۹۸/۲۰	۹۸/۲۷
٤	گرانیت	۸۸	٦۳	۲/٦٦۰	۲۸۱/۸۵	۲۸۱/۸۳	۲۸۱/۸۷	۱۰۰/۱۱	۱۰۰/۱۵
۵	هورنفلس	۱۳۲	٦۰	۲/۷٦۰	۲۷۰/۵٦	۲۷۰/٦۰	۲۷۰/۵٦	۹۸/۸۸	۹۸/۹۲
٦	هورنفلس	۱۸۸	۵۹	۲/۷۰	۲۳۹/۸٦	۲٤۰/۱۳	۲۳۹/۸٦	۹۵/۲۸	۹۵/۳۱
۷	هورنفلس	۹۷	۵٤	۲/٦۸	۱۷۸/۲۵	۱۷۸/٦۲	۱۷۸/۰۱	۸٦/۲۵	۸٦/۳۷

چنان‌که در جدول ۳ مشاهده می‌شود، نتایج به‌دست آمده هم‌خوانی بسیار خوبی با روابط ارائه شده توسط بارتون و کوبی و دییر دارند. با توجه به ضرایب رگرسیون به‌دست آمده از روابط مذکور (شکل‌های ۲ و۳) و هم‌چنین هم‌خوانی نتایج حاصل از این روابط با نتایج حاصل از روابط ارائه شده توسط محققان مذکور (جدول ۳)، استفاده از روابط پیشنهادی در این پژوهش، می‌تواند بسیار اطمینان بخش باشد.

نتیجه‌گیری

استفاده از چکش اشمیت در تعیین مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته سنگ‌ها یکی از روش‌های سریع و غیرمخرب تلقی می‌شود که با توجه به هزینهٔ کم، انجام این روش مقرون به صرفه است. در این پژوهش، دو رابطهٔ تجربی جدید برای محاسبهٔ مقاومت فشاری و مدول الاستیسیتهٔ سنگ ارائه شده است. از آن‌جا که روابط تجربی ارائه شده در این پژوهش، حاصل کاربرد چکش اشمیت بر روی سطوح درزهٔ سنگ‌هایی نظیر گرانیت، دیوریت و هورنفلس است، لذا کاربرد این روابط برای سنگ‌های سخت نتایج خوبی ارائه می‌کند و برای توده‌های سنگی سست و شدیداً درزه‌دار و هوازده پیشنهاد نمی‌شوند. با توجه به روابط مذکور مشخص

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1390.5.1.5.0]

می‌شود که ارتباط بین مقاومت فشاری سطوح درزه و مدول الاستیسیته با سختی بازگشتی اشمیت و وزن واحد حجم خشک سنگ، یک ارتباط مستقیم است. وقوع هوازدگی و افزایش تخلخل سنگ به‌شدت از وزن واحد حجم و مقدار سختی بازگشتی سنگ می‌کاهد و باعث کاهش مقاومت فشاری سطوح درزه و مدول الاستیسیته آن می‌شود. بنا بر این استفاده از روابط حاصل از این پژوهش چنین شرایطی منطقی به‌نظر نمی‌رسد. همچنین استفاده از روابط تجربی حاصل از کاربرد چکش اشمیت، می‌تواند از صرف وقت و هزینه‌های اضافی جلوگیری کند.

منابع

۱. خانلری، غلامرضا، *زمین‌شناسی مهندسی (ویژه دانشجویان عمران)*، انتشارات دانشگاه بوعلی‌سینا همدان (۱۳۸۸) ۳٦٤ صفحه.

۲. سپاهی‌گرو، علی‌اصغر، *پترولوژی مجموعه پلوتونیک الوند با نگرشی ویژه به گرانیتوئیدها*، پایان نامه دکتری پترولوژی، دانشکده علوم، دانشگاه تربیت معلم (۱۳۷۸).

۳. فریدونی، داود، *بررسی پایداری توده‌های سنگی شیب‌دار در مسیر گنج‌نامه- شهرستانه*، پایان‌نامه کارشناسی ارشد زمین‌شناسی مهندسی، دانشکده علوم، دانشگاه بوعلی‌سینا (۱۳۸۲) ۱۹۱ صفحه.

٤. فریدونی داود، *زمین‌شناسی عمومی و مهندسی*، انتشارات خانه ادبیات (۱۳۸۷) ٤٥۰ صفحه.

5. Aydin A., Basu A., "The Schmidt Hammer in rock material characterization", Eng. Geol. Vol. 81 (2005) 1-14.

6. Buyuksagis I. S., Goktan R. M., "The effect of Schmidt Hammer type on uniaxial compressive strength prediction of rock", Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Vol. 44 (2007) 299-307.

7. Hoek E., "Practical Rock Engineering", http://rockeng.utoronto.ca/rok/Hoek/Hoeknote, 2007.htm. (2007) 313.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1390.5.1.5.0]

8. Hudson J. A., Harrison J. P., "Engineering rock mechanics", an introduction to the principles, Elsevier Science Ltd. (2000) 458.
9. Kahraman S., "Evaluation of simple methods for assessing the uniaxial compressive strength of rock", Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Vol. 38 (2001) 981-994.
10. Kahraman S., Fener M., Gunaydin O., "Predicting the Schmidt hammer values of in–situ intact rock from core sample values", Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Vol.39 (2002) 395-399.
11. Katz O., Reches Z., Roegiers J. C., "Evaluation of mechanical rock properties using a Schmidt Hammer", Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Vol.37 (2000) 723-728.
12. Khanlari G. R., "Application of Rock Mass Characterization to Slope Stability Problems", PhD Thesis, Faculty of Civil & Mining Engineering, University of Wollongong, Australia (1996).
13. Kiyoo M., "Experimental Rock Mechanics", Taylor & Francis /Balkema, London, UK (2007) 380.
14. Yasar E., Erdogan Y., "Estimation of rock physiomechanical properties using hardness methods", Eng. Geol. Vol. 71 (2004) 281-288.
15. Yilmaz I., Sendir H., "Correlation of Schmidt hardness with unconfined compressive strength and Young's modulus in gypsum from Sivas", (Turkey). Eng. Geol. Vol. 66 (2002) 211-219.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1390.5.1.5.0]