

## تخمین سختی برشی شکست ( $K_{IIc}$ ) با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی

عبدالهادی قزوینیان<sup>۱\*</sup>، میررئوف هادی<sup>۲</sup>، همایون کردی<sup>۳</sup>

۱- استادیار دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس؛ Abdolhadi@yahoo.com

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مکانیک سنگ، دانشگاه تربیت مدرس؛ Raouf.Hadaie@gmail.com

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مکانیک سنگ، دانشگاه تربیت مدرس؛ homayoonkordi@yahoo.com

(دریافت ۳۱ اردیبهشت ۱۳۸۷، پذیرش ۱۳ مهر ۱۳۸۷)

### چکیده

در سال‌های اخیر با بهره‌گیری از روش‌های مختلف آزمایشگاهی، چگونگی مد برشی شکست با استفاده از نمونه‌های سنگی مورد بررسی قرار گرفته است. اغلب گسیختگی‌های رخ داده در طبیعت در اثر عملکرد نیروهای کششی و برشی در توده سنگ می‌باشد. تعیین دقیق سختی برشی شکست برای درک و تحلیل رفتار گسیختگی‌ها در حفاریات سطحی و زیرزمینی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار می‌باشد. بررسی جامع دستاوردهای علمی در خصوص تعیین سختی برشی شکست در نمونه‌های سنگی حاکی از دقت قابل قبول آزمایش‌های پانچ و جعبه برش برای این منظور بوده ولی کماکان مشکلاتی در تعیین سختی برشی شکست در فرایندهای محاسبه‌ای در مهندسی وجود دارد. شبکه‌های عصبی مصنوعی قادر هستند با آموزش صحیح، رابطه منطقی بین متغیرهای مختلف برقرار نموده و با دقت کافی، مقادیر سختی برشی شکست را پیش‌بینی نمایند. در این مقاله با استفاده از نتایج حاصل از آزمایشات آزمایشگاهی و انتخاب پارامترهای موثر در میزان سختی برشی شکست، مدل بهینه‌ای از شبکه عصبی مصنوعی برای هر سری از داده‌ها ایجاد شده و میزان دقت شبکه مورد ارزیابی قرار گرفته است. در انتها امکان مقایسه تطبیقی براساس مدل آماری رگرسیون خطی، عرضه شده است.

### کلمات کلیدی

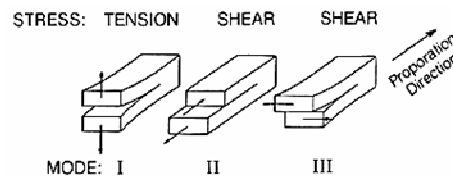
سختی برشی شکست، آزمایش پانچ و جعبه برش، شبکه‌های عصبی مصنوعی، رگرسیون خطی

۱- مقدمه

سابقه مکانیک شکست در سنگ به اواسط قرن بیستم در دهه ۶۰ و یکی از کاربردهای آن در ترکیدن انفجاری سنگ می باشد. تئوری مکانیک شکست وسیله‌ای است برای تعیین تنش شکست در واحد فاکتور شدت تنش، در مواردی که جسم دارای ترک با طول و جهت مشخص باشد [۱]. با علم به استحکام و هندسه ترک و تنش‌های ایجاد شده در توده سنگ، شکست و نحوه گسترش آن را می‌توان نخمین زد. سختی ترک، تمرکز تنش بحرانی را برای ایجاد و گسترش ترک نشان می‌دهد. شدت تنش در یک ماده که دارای ریز ترک‌ها با جهت و اندازه معلوم می‌باشند با علامت  $K$  که واحد آن  $\text{KNm}^{3/2}$  می‌باشد، نشان داده می‌شود. هنگامی که فاکتور تمرکز شدت تنش ترک به مقدار بحرانی می‌رسد، ترک رشد کرده و در سنگ گسترش می‌یابد. این مقدار بحرانی تحت عنوان سختی ترک نامیده می‌شود و با  $K_{IIIc}$ ,  $K_{IIc}$ ,  $K_{Ic}$  نشان داده می‌شوند. (اندیس‌ها نشان دهنده مد شکست می‌باشند) [۲].

۲- سختی برشی شکست ( $K_{IIc}$ )

شکستگی و گسترش ترک‌های موجود در سنگ، صرفاً در اثر نیروی برشی خالص نمی‌باشد. به هر حال این مفهوم در اغلب تحقیقات در این زمینه در نظر گرفته نشده است، بلکه شکستگی به دلیل عملکرد نیروهای مختلف رخ می‌دهد. این نیروها شامل نیروی کششی و نیروی برشی در جهات مختلف می‌باشد. برای روشن شدن این موضوع و ارائه واضح تر آن در این مطالعه، الگوی شکست به مد I, II و III تقسیم بندی می‌شود. (شکل ۱) [۳].



شکل ۱: الگوی مدهای شکست [۳]

با توجه به موارد مطرح شده در مورد الگوهای شکست، فرمول عمومی شدت تنش به صورت زیر ارائه شده است [۳]:

$$K_M = \sigma_o \sqrt{\pi a} f(a/w), \quad M = I, II, III \quad (1)$$

$$f(a/w) : \text{ضریب تصحیح شکل}$$

تادا فرمولی را برای تعیین سختی برشی شکست ارائه داده است که به صورت زیر می‌باشد [۳]:

$$K_{IIc} = \frac{2V_i}{\sqrt{\pi a_i}} \cdot F_{II} \left( \frac{a_i}{w_i} \right) \quad (2)$$

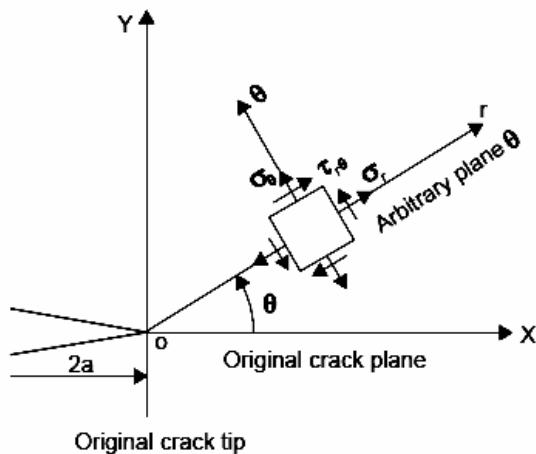
اغلب روش‌های ارائه شده در اندازه‌گیری  $K_{IIc}$  مواد سنگی بدون در نظر گرفتن الگوی شکست، بر پایه بکارگیری بارگذاری برش خالص می‌باشد ولی باید در نظر داشت که به کارگیری نیروی برشی خالص به معنی ایجاد ترک برشی خالص نمی‌باشد.

برای فهم این قضیه، ترکی به طول  $2a$  در صفحه‌ای نامحدود، تحت برش خالص در نظر گرفته می‌شود. تنش ایجاد شده در مختصات قطبی (شکل ۲) با روش و دستورات زیر محاسبه می‌شود [۳].

$$\sigma_r = \frac{\tau \sqrt{\pi a}}{\sqrt{2\pi a}} \sin \frac{\theta}{2} \left( 1 - 3 \sin^2 \frac{\theta}{2} \right) \quad (3)$$

$$\sigma_\theta = \frac{\tau \sqrt{\pi a}}{\sqrt{2\pi a}} \left( -3 \cos^2 \frac{\theta}{2} \sin \frac{\theta}{2} \right) \quad (4)$$

$$\tau_{r\theta} = \frac{\tau \sqrt{\pi a}}{\sqrt{2\pi a}} \cos \frac{\theta}{2} \left( 1 - 3 \sin^2 \frac{\theta}{2} \right) \quad (5)$$



شکل ۲: توزیع تنش نوک ترک در مختصات قطبی [۳]

فاکتور تمرکز تنش برای مدهای I و II با حد گرفتن از شدت تنش وقتی که  $\Gamma$  به صفر میل می‌کند به صورت زیر نوشته می‌شود [۳]:

$$K_I(\theta) = \tau \sqrt{2\pi a} \left( -3 \cos^2 \frac{\theta}{2} \sin \frac{\theta}{2} \right) \quad (6)$$

$$K_{II}(\theta) = \tau \sqrt{2\pi a} \cos \frac{\theta}{2} \left( 1 - 3 \sin^2 \frac{\theta}{2} \right) \quad (7)$$

۲-۱- اهمیت سختی برشی شکست ( $K_{IIc}$ )

تاکنون تحقیقات زیادی درباره شکستگی مد I (مد کششی) انجام شده و روش‌های پیشنهادی متعددی برای تعیین استحکام ترک  $K_{Ic}$  ارائه شده است. ترک‌های بوجود آمده در سنگ و ایجاد ناپیوستگی‌ها به ندرت در اثر بارگذاری کششی می‌باشد و بیشتر در اثر نیروهای برشی یا حالت مشترک کششی- برشی صورت می‌پذیرد.

توده سنگ شامل دو قسمت سنگ بکر و ناپیوستگی است که قسمت دوم به عنوان فاکتور ضعف توده سنگ به شمار می‌رود. برای مثال، شکست در پل سنگ و یا درزه‌های ناممتد در اثر شکست مد II و نیروی برشی در سنگ بوجود می‌آید.

هرچند برای این مد از شکست در مکانیک سنگ اهمیت زیادی قائل می‌شوند اما هنوز نقص‌های زیادی در تحقیقات اولیه در این زمینه وجود دارد و معیارهای شکست مد مشترک، هنوز قادر به پیش بینی استحکام ترک در مد II نمی‌باشند. بنابراین ارائه معیار قابل قبول برای پیش‌بینی سختی برشی شکست و تعیین  $K_{IIc}$ ، یک امر لازم و ضروری است. استحکام شکست مد II وابستگی زیادی به نیروی عمودی ایجاد شده در صفحه شکست دارد و بعضی از پژوهشگران براین عقیده‌اند که ترک مد II تنها در شرایط تنش جانبی بالا اهمیت پیدا می‌کند. همانطور که اشاره شد در طبیعت ایجاد شکستگی مد II در اثر نیروهای برشی نمی‌باشد و بیشتر روش‌های ارائه شده در اندازه‌گیری  $K_{IIc}$  مواد سنگی بدون در نظر گرفتن الگوی شکست، برپایه بارگذاری برش خالص می‌باشد. برای مثال آزمایش چهار نقطه‌ای غیر متقارن روشی معمول برای اندازه‌گیری  $K_{IIc}$  است که در آن ترک در زیر مرکز تحتانی نمونه نیم دایره‌ای، جایی که فقط نیروی برشی خالص وجود دارد ایجاد می‌گردد. انتشار ترک با زاویه ۵۰ تا ۷۰ درجه که نسبت به ترک اصلی منتشر می‌شود، نشان می‌دهد که ترک ایجاد شده از نوع ترک مد II نمی‌باشد و این موضوع با توجه به اینکه میزان  $K_{IIc}$  به دست آمده کمتر یا نزدیک به  $K_{Ic}$  می‌باشد، نتایج این آزمایش را زیر سوال می‌برد [۳].

در سالهای اخیر دو آزمایش نسبتاً قابل قبول جهت بررسی میزان  $K_{IIc}$  ارائه گردیده است که در این تحقیق از نتایج حاصل از این روش‌ها استفاده می‌شود.

۲-۲- روش‌های اندازه‌گیری سختی برشی شکست ( $K_{IIc}$ )

ترک کششی اغلب در طبیعت مشاهده می‌شود و اندازه‌گیری استحکام ترک کششی توسط استانداردهای ISRM

زاویه آغاز ترک  $\theta_{Ic}$  و  $\theta_{IIc}$  زمانی که مقادیر  $K_{Ic}$  و  $K_{IIc}$  بیشینه باشند به دست می‌آید (با مساوی صفر قرار دادن مشتق K نسبت به  $\theta$ ).

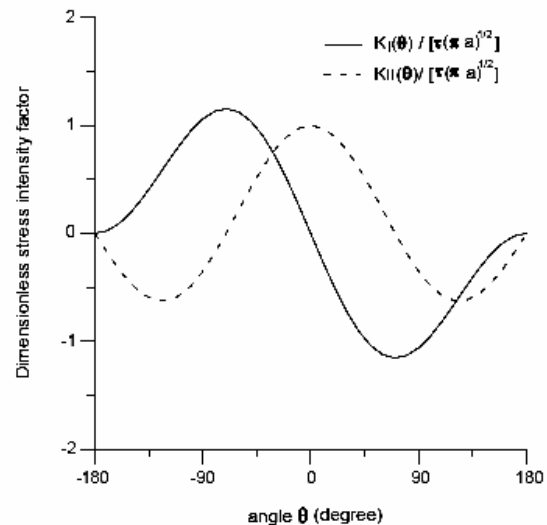
در شکل ۳ تغییرات  $K_I(\theta)/\sigma\sqrt{\pi a}$  و  $K_{II}(\theta)/\sigma\sqrt{\pi a}$  نسبت به  $\theta$  در تنش برشی خالص مشاهده می‌شود و به ازای  $\theta_{IIc} = 0$  مقدار  $K_{IIc}$  به مقدار  $K_I(\theta)$  می‌رسد، در حالی که  $K_I$  برابر صفر است. از آنجا که  $K_{I\max}$  برابر  $K_{II\max}$  می‌باشد، می‌توان گفت که ترک مد I قبل از ترک مد II اتفاق افتاده و در نتیجه در آزمایش برش خالص ترک، شکست ایجاد شده از نوع کششی می‌باشد [۳].

$$\frac{\partial k_I(\theta)}{\partial \theta} = \frac{3}{2} \cos \frac{\theta}{2} (3 \sin^2 \frac{\theta}{2} - 1) \tau \sqrt{\pi a} = 0 \quad \frac{\partial^2 k_I(\theta)}{\partial \theta^2} < 0 \quad (8)$$

$$\frac{\partial k_{II}(\theta)}{\partial \theta} = \frac{1}{2} \sin \frac{\theta}{2} (9 \sin^2 \frac{\theta}{2} - 7) \tau \sqrt{\pi a} = 0 \quad \frac{\partial^2 k_{II}(\theta)}{\partial \theta^2} < 0 \quad (9)$$

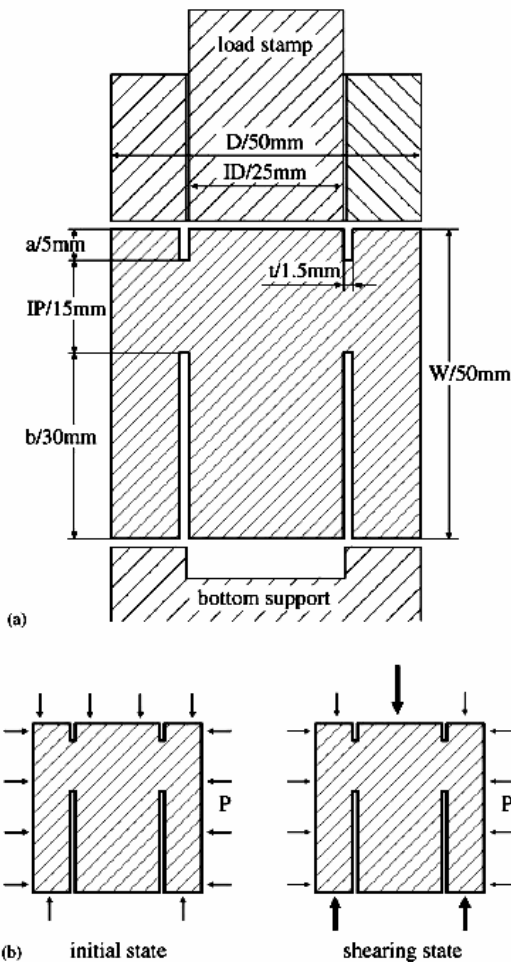
$$\theta_{Ic} = -70.5^\circ: \quad k_{I\max} = 1.15 \tau \sqrt{\pi a}, \quad k_{II}(\theta_{Ic}) = 0$$

$$\theta_{IIc} = 0: \quad k_{II\max} = \tau \sqrt{\pi a}, \quad k_I(\theta_{IIc}) = 0 \quad (10)$$



شکل ۳: نمودار تغییرات مد برشی و کششی شکست نسبت به  $\theta$  [۳]

در این تحقیق  $K_{IIc}$  برای سنگ‌های مختلف توسط آزمایش‌های پانچ<sup>۱</sup> و جعبه برش<sup>۲</sup> بدست آمده است. با مدل بدست آمده بر اساس الگوی شبکه عصبی مصنوعی، می‌توان میزان سختی ترک برای نمونه‌های سنگی را تخمین زد.



شکل ۴: مشخصات آزمایش PST [۴]

می‌رسد، که این مقدار بیشتر از فاکتور شدت تنش بدون بعد برشی در زوایای ۴۰ تا ۹۰ است. به منظور حذف تنش کششی زیاد در اطراف ترک در زوایای ۴۰ تا ۶۰ درجه و اجتناب از ایجاد ترک مد I نیروی فشاری عمود بر شکاف را باید افزایش داد. شکل ۵ نمایی از بارگذاری ایده‌آل برای ایجاد ترک مد II را نشان می‌دهد که این رهیافت در آزمایش جعبه برش مطابق شکل ۶ مورد استفاده قرار می‌گیرد. با طراحی یک صفحه می‌توان این نیروی محدود کننده فشاری را با استفاده از دستگاه فشاری تک محوره اعمال کرد. این روش به عنوان روشی برای بدست آوردن مد برشی شکست توسط آقایان استیلبورگ<sup>۹</sup>، چانلین<sup>۱۰</sup>، استپانسن<sup>۱۱</sup>، زونگی سونا<sup>۱۱</sup> و کیوهو روا<sup>۱۲</sup> مورد استفاده قرار گرفته است. در این تحقیق از نتایج آزمایش‌های صورت گرفته در سال ۲۰۰۳ بر روی سنگ گرانیت برای آموزش شبکه استفاده شده است [۳].

صورت می‌گیرد. تعیین استحکام مد II در سنگ هنوز مورد بحث پژوهشگران بوده و به این دلیل هنوز هیچ استاندارد برای تعیین مقدار استحکام ترک در حالت مد II ارائه نشده است. روشی که در گذشته مورد استفاده قرار می‌گرفت، روش چهار نقطه‌ای غیر متقارن بود که به دلایل بالا دارای نقایص تئوری زیادی می‌باشد.

دو روش جدید برای بررسی استحکام ترک توسعه یافته است. روش اول تحت عنوان اندازه‌گیری استحکام ترک با دستگاه پانچ<sup>۳</sup> [۴] و روش دیگر، بهره‌گیری از دستگاه جعبه برش<sup>۴</sup> می‌باشد [۳]. در هر دو روش از نمونه‌هایی که در آنها شکافی از مرکز تا انتهای نمونه ایجاد شده برای شبیه سازی شکاف و تعیین استحکام آن استفاده می‌گردد.

#### ۲-۲-۱- آزمایش پانچ

آزمایش پانچ در نمونه‌های استوانه‌ای که در آن یک شکاف دایره‌ای به عنوان ترک اولیه بدون اصطکاک ایجاد شده، انجام می‌گیرد. نمونه‌های پیشنهادی و نیروهای اصلی و ابعاد آنها در شکل ۴ ارائه شده‌اند [۴].

هندسه پیشنهادی، ابعاد و نحوه بارگذاری ارائه شده در شکل ۴ به شرح ذیل می‌باشد:

ارتفاع نمونه:  $W$

قطر نمونه:  $D$

قطر استوانه داخلی:  $ID$

عمق ترک بالایی:  $a$

عمق ترک پایینی:  $b$

سهم سنگ بکر:  $IP$

عرض ترک:  $t$

فشار جانبی:  $P$

تنش محوری:  $\sigma$

در این تحقیق برای تخمین مد برشی شکست به وسیله شبکه عصبی مصنوعی، از نتایج آزمایش پانچ صورت گرفته توسط آقایان بکرس<sup>۵</sup>، درینسن<sup>۶</sup>، استپانسن<sup>۷</sup> و ریباکی<sup>۸</sup> در سال ۲۰۰۴ و بکرس، استپانسن و ریباکی در سال ۲۰۰۲ استفاده شده است [۵].

#### ۲-۲-۲- آزمایش جعبه برش

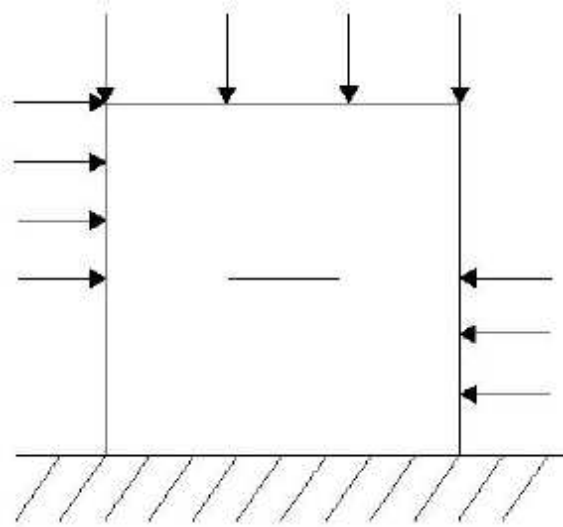
همانطور که در شکل ۳ دیده شد وقتی که ترک تحت بارگذاری برشی خالص قرار می‌گیرد، میزان شدت تنش بدون بعد  $K_I(\theta) / \tau\sqrt{\pi a}$  در زاویه  $70/5$  درجه به مقدار ماکزیمم خود

بخشیدن به رابطه بین داده‌های ورودی و خروجی به واسطه افزایش تعداد محاسبات ممکن می‌شود. در حالیکه با افزایش تعداد لایه‌ها ممکن است شبکه تنها به سمت نقاط داده‌های آموزشی متمایل شود و در نواحی خارج از آنها ایجاد خطای قابل توجهی نماید. اگرچه ممکن است شبکه قادر باشد جواب‌های تقریباً یکسانی را برای داده‌های آموزشی بدست آورد، اما همین شبکه ممکن است برای نقاط جدید نتواند جواب مناسب تهیه کند، که این نتیجه برآزش بیش از حد<sup>۱۳</sup> می‌باشد [۶].

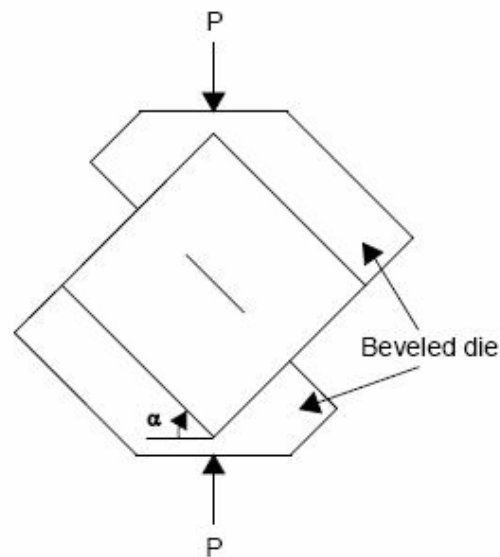
برای تولید یک شبکه بهینه که بتواند جهت پیش‌بینی ضریب تمرکز تنش به کار رود باید ابتدا شبکه عصبی را آموزش و سپس آنرا با زیر مجموعه‌ای از تمامی داده‌ها، مورد آزمایش قرار داد. این رویه به عنوان آزمایش‌های راهنما<sup>۱۴</sup> نام‌گذاری می‌شود. این آزمایش‌ها براساس تعدادی از نمونه است که حاوی داده ورودی و اطلاعات مشاهده شده یا اندازه‌گیری شده می‌باشند. در آزمایش‌های راهنما، داده‌های موجود به دو دسته داده‌های آموزش و داده‌های ارزیابی دسته‌بندی می‌شوند [۷].

شبکه‌های مختلف با تعداد لایه‌های پنهان گوناگون تحت آموزش قرار می‌گیرند و سپس کارایی این شبکه با دسته نمونه‌ها یا آزمایش، مورد ارزیابی قرار گرفته و بهترین شبکه که کارایی بهتری در داده‌های ارزیابی داشته باشد، شناسایی می‌شود.

با توجه به اینکه بدست آوردن مد برشی شکست نیازمند تجهیزات آزمایشگاهی ویژه‌ای است و تهیه نمونه مناسب برای این آزمایش‌ها نیز بسیار مشکل است. و از طرف دیگر تعیین ضریب تصحیح شکل<sup>۱۵</sup>  $f(a/w)$  در فرمول عمومی ضریب تمرکز تنش (فرمول ۱) هدف بیشتر روش‌های تحلیل ترک می‌باشد. بنابراین تعداد کمی جواب برای معادله بالا وجود دارد. بیشتر عبارات تابع یاد شده با تقریب‌های تجربی، عددی و روش‌های تحلیلی نظیر تابع تنش وسترگارد<sup>۱۶</sup>، تابع وزنی بوکندر<sup>۱۷</sup> و غیره بدست می‌آیند. همچنین موقعیت ترک موجود در نمونه نیز در بدست آوردن ضریب تصحیح شکل موثر است. با در نظر گرفتن مطالب مذکور سعی بر آن است تا با پیدا کردن روشی جدید، سختی برشی شکست در سنگ‌ها را محاسبه کرد. با بهره‌گیری از مدل شبکه عصبی مصنوعی بر اساس داده‌های موجود که تقریباً طیفی از انواع سنگ‌های سخت، متوسط و ضعیف را شامل می‌شود، سختی برشی شکست تخمین زده شد تا دید مناسب‌تری از نحوه انتشار ترک



شکل ۵: نحوه بارگذاری ایده‌ال برای ایجاد ترک مد II [۳]



شکل ۶: نحوه بارگذاری برای ایجاد ترک مد II در آزمایش جعبه برش [۳]

### ۳- طراحی بهینه شبکه عصبی مصنوعی برای تخمین سختی برشی شکست

بطور کلی، هیچ روش صریح و واضحی برای تعیین مناسب‌ترین تعداد لایه‌ها و نرون‌های بین لایه ورودی و خروجی در شبکه عصبی وجود ندارد. این مسئله وقتی که تعداد لایه‌های مخفی در شبکه عصبی افزایش پیدا می‌کند پیچیده‌تر نیز می‌شود. تصور عمومی در مورد شبکه‌های عصبی این است که افزایش تعداد لایه‌های مخفی باعث بالا رفتن پتانسیل آن به منظور توسعه شبکه، جهت بهبود

۳- برای آزمایش‌های صورت گرفته به وسیله دستگاه پانچ در سال ۲۰۰۴، تعداد لایه‌های مخفی: ۱، تعداد گره‌ها در هر لایه: ۱۰ و تعداد دوره‌های آموزشی: ۹۰۰ می‌باشد.

۴- برای مجموع نتایج بدست آمده از آزمایش‌های صورت گرفته به وسیله دستگاه پانچ در سال ۲۰۰۲ و ۲۰۰۴، تعداد لایه‌های مخفی: ۲، تعداد گره‌ها در لایه اول: ۱۰ و لایه دوم: ۵، تعداد دوره‌های آموزشی: ۹۰۰ می‌باشد.

بعد از هر دوره آموزش، مدل‌های مذکور با داده‌های ارزیابی مورد آزمایش قرار می‌گیرند. دسته داده‌های ارزیابی به عنوان ورودی به شبکه وارد می‌شوند (از گره‌های ورودی) و لایه به لایه توزین شده و در لایه خروجی سیگنال آنها دریافت می‌شود. خروجی‌ها که در واقع سختی برشی شکست پیش بینی شده است با خروجی‌های مورد نظر (مقادیر بدست آمده از آزمایش) مقایسه شده و اگر خروجی‌های شبکه حاصل از آزمایش‌های راهنما در تطابق و هماهنگی مناسبی با داده‌های واقعی اندازه‌گیری شده یا هدف داشته باشد، ساختار شبکه موجود را می‌توان برای داده‌های موجود مناسب تلقی کرد. برای ارزیابی کارایی مدل ایجاد شده از مجموع مربعات خطاها<sup>۱۸</sup> استفاده شده که رابطه آن به صورت زیر می‌باشد:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (o_i - t_i)^2}{N}} \quad (11)$$

در رابطه فوق: N تعداد الگوهای موجود در دسته داده‌های ارزیابی است. O خروجی حاصل از شبکه عصبی، t داده هدف است. RMSE عمومی‌ترین روش جهت مقایسه کارایی شبکه‌های مختلف می‌باشد که در تحقیقات حاضر O میزان مد برشی تخمین زده شده با شبکه عصبی و t میزان مد برشی اندازه‌گیری شده به وسیله آزمایش می‌باشد. این تحقیق جهت شناسایی کارایی شبکه‌های عصبی مصنوعی در تخمین میزان مد برشی شکست در مکانیک شکست سنگ صورت گرفت و در نهایت مشاهده شد که شبکه عصبی رو به جلو که توسط روش پس انتشار آموزش دیده، به خوبی قادر به تخمین مقادیر مد برشی شکست می‌باشد. از این رو با انجام آزمایش‌های راهنمای مختلف بر روی این داده‌ها مشخص می‌شود که تعداد لایه‌های مخفی و گره‌های موجود در آنها در میزان خطای حاصل مهم هستند. بطوریکه با افزایش تعداد لایه‌ها و گره‌های میانی

در سنگ بدست آید. به همین منظور از داده‌های حاصل از آزمایش‌های صورت گرفته (توسط افرادی که در بالا به آنها اشاره شد) به عنوان داده‌های آموزش و ارزیابی، مورد استفاده قرار گرفته و برای مشخص کردن بهترین شبکه عصبی مصنوعی، این داده‌ها وارد شبکه عصبی شدند (جدول ۱). در این شبکه لایه ورودی شامل پارامترهای تأثیرگذار در سختی برشی شکست می‌باشد. در ادامه مدل شبکه عصبی با مدل آماری رگرسیون خطی مقایسه شد تا توانایی بالای شبکه عصبی در تخمین سختی برشی شکست مورد ارزیابی قرار گیرد.

برای بدست آوردن یک شبکه با کارایی مناسب که بتواند پیش‌بینی مناسبی از سختی برشی شکست برای داده‌های جدید به عمل آورد، داشتن یک ساختار بهینه برای شبکه امری ضروری است. بدین منظور تلاش می‌شود تا بهترین ساختار شبکه عصبی برای داده‌های موجود و نیز میزان یا تعداد «دوره‌ها»، جهت تخمین مناسب این فرایند شناسایی گردد.

جدول ۱: کدهای ورودی مورد استفاده شبکه عصبی

نوع نمونه	کد نمونه	نوع تست	کد تست
گرانیت	۱	پانچ	۱
سنگ آهک	۲	جعبه برش	۲
مرمر	۳		
دیوریت	۴		

پارامترهای مختلفی بر اساس سعی و خطا مورد ارزیابی قرار

گرفتند که مناسب‌ترین آنها، عبارتند از:

۱- معماری کلی ساختار شبکه عصبی که خود شامل تعداد لایه‌های مخفی و نیز تعداد گره‌های موجود در هر لایه مخفی می‌باشد.

۲- تعداد «دوره‌های» آموزش

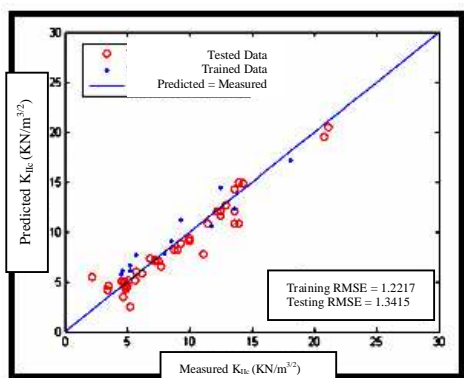
۳- تعداد پارامترهای ورودی شبکه

در نهایت ۴ شبکه عصبی برای هر گروه داده طراحی شد که ساختار این مدلها به شرح زیر می‌باشد:

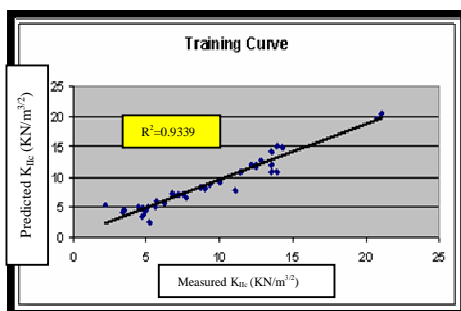
۱- برای آزمایش‌های صورت گرفته بر روی گرانیت (پانچ و جعبه برش) تعداد لایه‌های مخفی: ۱، تعداد گره‌ها در هر لایه: ۱۰ و تعداد دوره‌های آموزشی: ۱۱۰۰ می‌باشد.

۲- برای آزمایش‌های صورت گرفته به وسیله دستگاه پانچ در سال ۲۰۰۲، تعداد لایه‌های مخفی: ۱، تعداد گره‌ها در هر لایه: ۱۰ و تعداد دوره‌های آموزشی: ۹۰۰ می‌باشد.

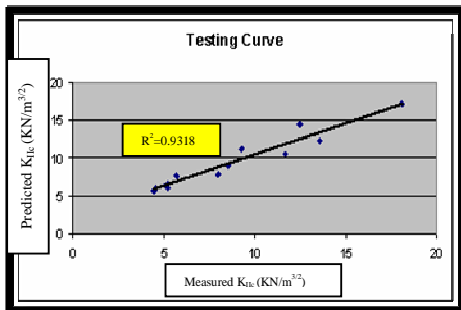
مقدار متوسط ریشه دوم مربع خطا در حدود  $1/3 \text{ KNm}^{3/2}$ ، دقت بسیار خوبی برای پیش‌بینی مد برشی شکست نمونه‌های گرانیتی دارد.



شکل ۷: مدل اجرائی شبکه عصبی بر اساس داده‌های آموزش و آزمایش



شکل ۸: برازش خطی مدل شبکه عصبی برای داده‌های آموزش



شکل ۹: برازش خطی مدل شبکه عصبی برای داده‌های آزمایش

۴-۱-۲- پیش‌بینی سختی برشی شکست نمونه‌های گرانیتی به روش رگرسیون خطی

در این مرحله مدلی با ۵ متغیر ورودی که شامل نوع آزمایش، مدول سنگ، نسبت طول ترک لبه‌ای به ضخامت نمونه در بالا و پائین نمونه و فشار جانبی و خروجی آن نیز سختی برشی شکست ( $K_{IIc}$ ) می‌باشد، مطابق با مدل شبکه عصبی، بر اساس تحلیل آماری رگرسیون خطی طراحی شد. بر اساس نتایج بدست آمده، این مدل نمی‌تواند رابطه خوبی با

داده‌های آموزشی به‌تر مورد ارزیابی قرار می‌گیرند ولی این روند می‌تواند منجر به برآزش بیش از حد شود. این مطلب در مورد تعداد «دوره‌ها» نیز صادق است و سبب بیش یادگیری<sup>۱۹</sup> می‌شود. مدلی که دارای بیشترین لایه میانی و بیشترین گره می‌باشد دارای خطای کمتری در داده‌های آموزشی است ولی میزان خطای داده‌های ارزیابی آن زیاد بوده و قادر نیست به خوبی میزان مد برشی شکست را ارزیابی نماید. بنابراین براساس سری‌های ارزیابی، بهترین مدل که شامل کمترین مقدار RMSE در داده‌های ارزیابی بوده و نزدیک به مقدار RMSE داده‌های آموزش باشد، شناسایی گردید. بعد از شناسایی بهترین شبکه موجود، این شبکه برای پیش‌بینی مد برشی شکست برای نمونه‌های مختلف سنگی به کار گرفته شد تا:

- ۱) کارایی شبکه عصبی مصنوعی برای پیش‌بینی مد برشی شکست نمونه‌های سنگی موجود مورد ارزیابی قرار گیرد.
- ۲) محدودیت‌های موجود برای پیش‌بینی میزان مد برشی شکست نمونه‌های سنگی مشخص شود.

#### ۴- پیش‌بینی سختی برشی شکست نمونه‌های سنگی

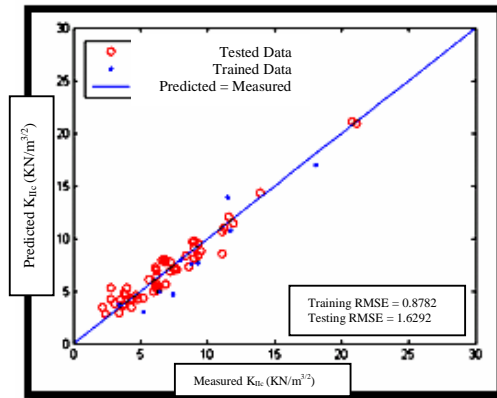
۴-۱- اساس داده‌های آزمایش‌های پانچ و جعبه برش

برای پیش‌بینی سختی برشی شکست، از داده‌های آزمایش‌های پانچ که در سال ۲۰۰۲ و ۲۰۰۴ و آزمایش جعبه برش در سال ۲۰۰۳ که توسط آقای روا<sup>۲۰</sup> بر روی نمونه‌های گرانیتی انجام گرفته، جهت آموزش شبکه عصبی و مدل رگرسیون خطی استفاده گردید.

۴-۱-۱- پیش‌بینی سختی برشی شکست نمونه‌های گرانیتی

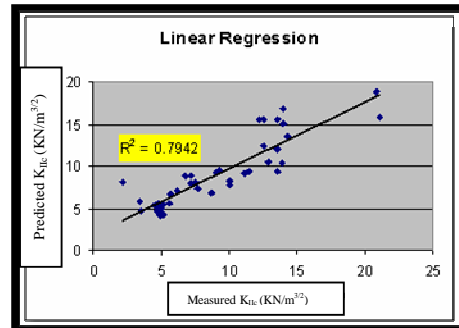
##### با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی

در اینجا ابتدا مناسب‌ترین شبکه که شامل یک لایه پنهان با ۱۰ نرون بوده و داده‌های ورودی شامل ۵ متغیر (نوع آزمایش، مدول سنگ، نسبت طول ترک لبه‌ای به ضخامت نمونه در بالا و پائین نمونه و فشار جانبی) و خروجی آن نیز سختی برشی شکست ( $K_{IIc}$ ) می‌باشد، به وسیله سعی و خطا شناسایی گردید. این مدل دارای کمترین مقدار خطا بوده که این مطلب در شکل شماره ۷ با خطای مجاز ۱۰٪ نشان داده شده است. با توجه به نتایج بدست آمده در شکل شماره ۸ و ۹ می‌توان گفت که این شبکه با رگرسیون در حدود ۹۳٪ و

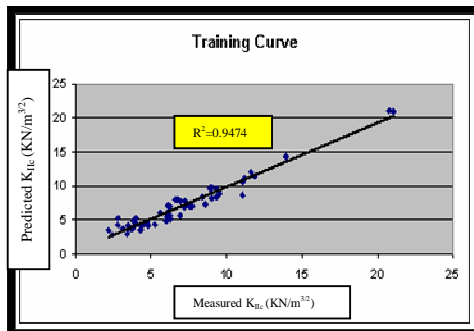


شکل ۱۱: مدل اجرائی شبکه عصبی بر اساس داده‌های آموزش و آزمایش

سطح معنا داری مناسب بین سختی برشی شکست با نسبت ترک‌های لبه‌ای و نوع آزمایش برقرار کند، این نتایج در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود.



شکل ۱۰: برازش خطی برای مدل رگرسیون خطی



شکل ۱۲: برازش خطی مدل شبکه عصبی برای داده‌های آموزش

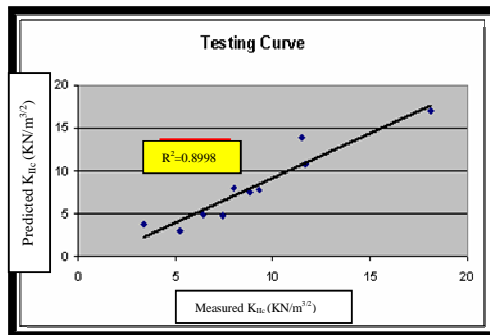
۲-۴- پیش بینی سختی برشی شکست نمونه‌های کد ۳۲۰۱ و ۳۲۰۲ برای پیش بینی سختی برشی شکست، از داده‌های آزمایش‌های پنج که در سال ۲۰۰۲ بر روی نمونه‌های کد ۳۲۰۱ و ۳۲۰۲ توسط آقایان بکرس، استپانسن و ریبکی انجام گرفته، جهت آموزش شبکه عصبی و مدل رگرسیون خطی استفاده گردید.

۲-۴-۱- پیش بینی سختی برشی شکست نمونه‌های کد ۳۲۰۱ با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی

در اینجا ابتدا مناسب‌ترین شبکه، که شامل یک لایه پنهان با ۱۰ نرون بوده و داده‌های ورودی شامل ۵ متغیر (نوع نمونه، مدول سنگ، نسبت طول ترک لبه‌ای به ضخامت نمونه در بالا و پائین نمونه و فشار جانبی) و خروجی آن نیز سختی برشی شکست ( $K_{IIc}$ ) می‌باشد، به وسیله سعی و خطا شناسایی گردید. این مدل دارای کمترین مقدار خطا بوده که این مطلب در شکل شماره ۱۱ با خطای مجاز ۱۰٪ مشاهده می‌شود. با توجه به نتایج ارائه شده در شکل شماره ۱۲ و ۱۳ می‌توان گفت این شبکه با رگرسیون در حدود ۹۰٪ و مقدار متوسط ریشه دوم مربع خطا در حدود  $1/63 \text{ KNm}^{3/2}$ ، دقت بسیار خوبی برای پیش بینی مد برشی شکست دارد.

۲-۴-۲- پیش بینی سختی برشی شکست نمونه‌های کد ۳۲۰۱ به روش رگرسیون خطی

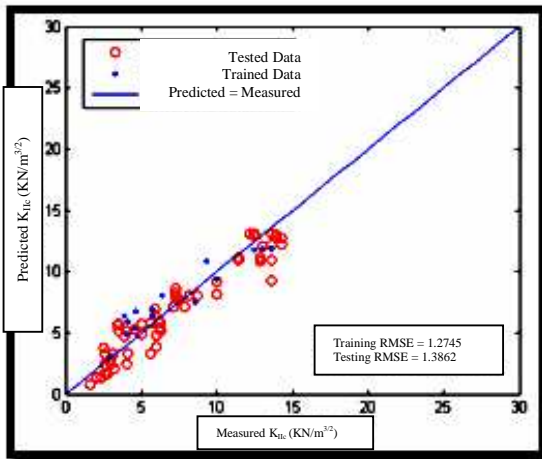
در این مرحله مدلی با ۵ متغیر ورودی که شامل نوع نمونه سنگی، مدول سنگ، نسبت طول ترک لبه‌ای به ضخامت نمونه در بالا و پائین نمونه و فشار جانبی و خروجی آن نیز سختی



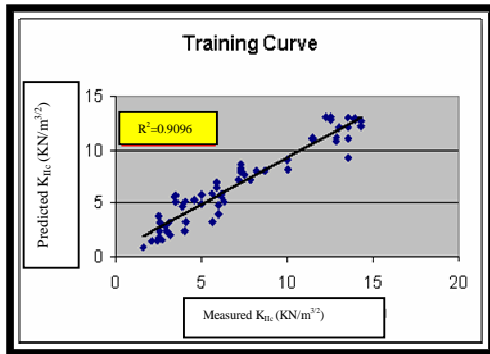
شکل ۱۳: برازش خطی مدل شبکه عصبی برای داده‌های آزمایش

برشی شکست ( $K_{IIc}$ ) می‌باشد، مطابق با مدل شبکه عصبی، بر اساس تحلیل آماری رگرسیون خطی طراحی شد. بر اساس نتایج بدست آمده، این مدل نمی‌تواند رابطه خوبی با سطح معنا داری مناسب بین سختی برشی شکست با نسبت ترک‌های لبه‌ای ( $a/w$ ) برقرار کند، این نتایج در شکل ۱۴ ارائه شده است.

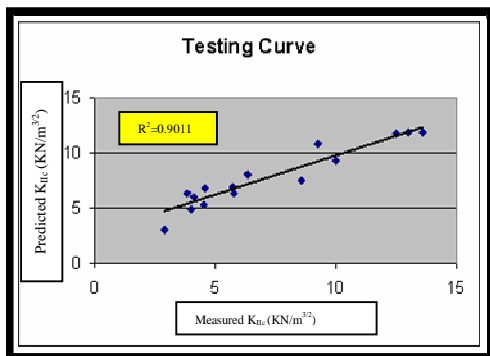




شکل ۱۵: مدل اجرایی شبکه عصبی بر اساس داده‌های آموزش و آزمایش

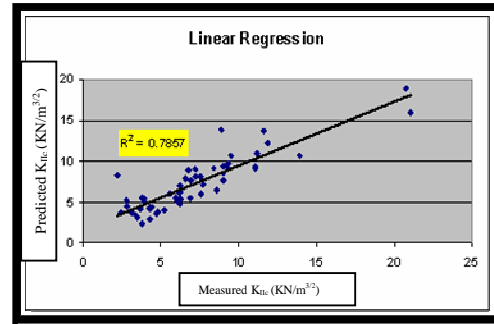


شکل ۱۶: برازش خطی مدل شبکه عصبی برای داده‌های آموزش



شکل ۱۷: برازش خطی مدل شبکه عصبی برای داده‌های آزمایش

بر اساس نتایج بدست آمده، این مدل نمی‌تواند رابطه‌ای بین سختی برشی شکست با نسبت ترک‌های لبه‌ای ( $a/w$ ) برقرار کند. بنابراین، این دو متغیر مستقل را از مدل خارج کرده و مدلی با سه متغیر مستقل (نوع نمونه، مدول سنگ و فشار جانبی) و یک متغیر وابسته ارائه شد که با



شکل ۱۴: برازش خطی برای مدل رگرسیون خطی

۳-۴- پیش‌بینی سختی برشی شکست نمونه‌های کد ۱، ۲، ۳، ۴، ۵

برای پیش‌بینی سختی برشی شکست، از داده‌های آزمایش‌های پانچ که در سال ۲۰۰۴ بر روی نمونه‌های کد ۱، ۲، ۳، ۴، و ۵ توسط آقایان بکرس، درینسن، استپانسن و ریبکی انجام گرفته، جهت آموزش شبکه عصبی و مدل رگرسیون خطی استفاده گردید.

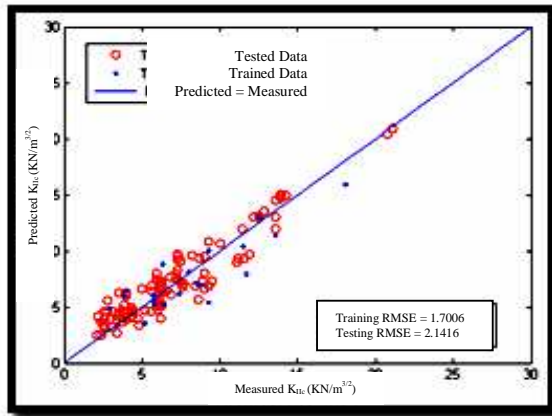
۳-۴-۱- پیش‌بینی سختی برشی شکست نمونه‌های کد ۱، ۲، ۳، ۴، ۵ با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی

در اینجا ابتدا مناسب‌ترین شبکه که شامل یک لایه پنهان با ۱۰ نرون بوده و داده‌های ورودی شامل ۵ متغیر (نوع نمونه، مدول سنگ، نسبت طول ترک لبه‌ای به ضخامت نمونه در بالا و پائین نمونه و فشار جانبی) و خروجی آن نیز سختی برشی شکست ( $K_{IIc}$ ) می‌باشد، به‌وسیله سعی و خطا شناسایی گردید. این مدل کمترین مقدار خطا را دارد که این مطلب در شکل شماره ۱۵ با خطای مجاز حداکثر ۱۰٪ نشان داده شده است. با توجه به نتایج ارائه شده در شکل شماره ۱۶ و ۱۷ می‌توان گفت این شبکه با رگرسیونی در حدود ۹۰٪ و مقدار متوسط ریشه دوم مربع خطا در حدود  $1/4 \text{ KNm}^{3/2}$ ، دقت بسیار خوبی برای پیش‌بینی سختی برشی شکست دارد.

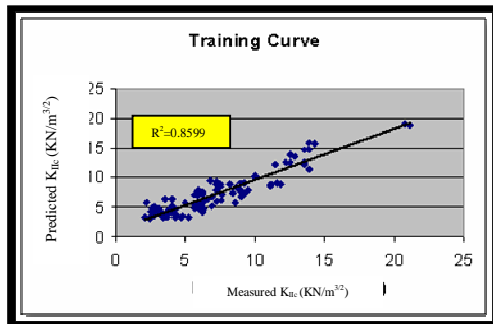
۳-۴-۲- پیش‌بینی سختی برشی شکست نمونه‌های کد ۱، ۲، ۳، ۴، ۵ به روش رگرسیون خطی

در این مرحله مدلی با ۵ متغیر ورودی که شامل نوع نمونه سنگی، مدول سنگ، نسبت طول ترک لبه‌ای به ضخامت نمونه در بالا و پائین نمونه و فشار جانبی و خروجی آن نیز سختی برشی شکست ( $K_{IIc}$ ) می‌باشد، مطابق با مدل شبکه عصبی، بر اساس تحلیل آماری رگرسیون خطی طراحی شد.

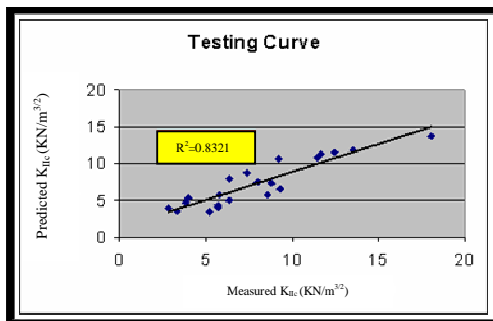
باعث بالا رفتن خطای شبکه نسبت حالت قبل (بخش ۴-۲) شده است.



شکل ۱۹: مدل اجرائی شبکه عصبی بر اساس داده‌های آموزش و آزمایش



شکل ۲۰: برازش خطی مدل شبکه عصبی برای داده‌های آموزش

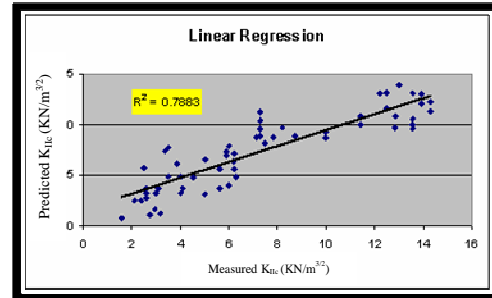


شکل ۲۱: برازش خطی مدل شبکه عصبی برای داده‌های آزمایش

۴-۴-۲- پیش‌بینی سختی برشی شکست نمونه‌های کد ۲، ۱ و ۳ به روش رگرسیون خطی

در این مرحله مدلی با ۵ متغیر ورودی که شامل نوع نمونه سنگی، مدول سنگ، نسبت طول ترک لبه‌ای به ضخامت نمونه در بالا و پائین نمونه و فشار جانبی و خروجی آن نیز سختی برشی شکست ( $K_{IIc}$ ) می‌باشد، مطابق با مدل شبکه عصبی،

رگرسیونی در حدود ۷۹٪ (شکل ۱۸) می‌تواند برای پیش‌بینی سختی برشی شکست بکار رود، ولی در مقایسه با شبکه عصبی از دقت مناسبی برخوردار نیست.



شکل ۱۸: برازش خطی برای مدل رگرسیون خطی

۴-۴-۳- پیش‌بینی سختی برشی شکست نمونه‌های کد ۱، ۲، ۳ برای پیش‌بینی سختی برشی شکست، از داده‌های آزمایش‌های پانچ که بر روی نمونه‌های کد ۱، ۲ و ۳ توسط آقایان: بکرس، استپانسنو ریبکی در سال ۲۰۰۲ و بکرس، درینسن، استپانسن و ریبکی در سال ۲۰۰۴ انجام گرفته، جهت آموزش شبکه عصبی و مدل رگرسیون خطی استفاده گردید.

۴-۴-۱- پیش‌بینی سختی برشی شکست نمونه‌های کد ۱، ۲ و ۳ با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی

در اینجا نیز ابتدا مناسب‌ترین شبکه که شامل دو لایه پنهان با ۱۰ و ۵ نرون بوده و داده‌های ورودی شامل ۵ متغیر (نوع نمونه، مدول سنگ، نسبت طول ترک لبه‌ای به ضخامت نمونه در بالا و پائین نمونه و فشار جانبی) و خروجی آن نیز سختی برشی شکست ( $K_{IIc}$ ) می‌باشد، به وسیله سعی و خطا شناسایی گردید. این مدل دارای کمترین مقدار خطا بوده که این مطلب در شکل شماره ۱۹ با خطای مجاز حداکثر ۱۰٪ آورده شده است. با توجه به نتایج ارائه شده در شکل شماره ۲۰ و ۲۱ می‌توان گفت این شبکه با رگرسیونی در حدود ۸۳٪ و مقدار متوسط ریشه دوم مربع خطا در حدود  $2.1 \text{ KNm}^{3/2}$ ، دقت مناسبی برای پیش‌بینی سختی برشی شکست دارد. از آنجا که داده‌های مورد استفاده برای آموزش شبکه در این مرحله شامل، دو سری آزمایش می‌باشد که توسط افراد مختلف و در زمان‌های مختلف انجام گرفته، بنابراین به خاطر شرایط متفاوت حاکم بر این آزمایش‌ها نتایج حاصل از آنها در نمونه‌های کد ۱، ۲ و ۳ دارای مقداری خطا بوده و این موضوع

میزان تنش برشی لازم برای گسترش ترک با سختی برشی شکست ( $K_{IIc}$ ) را بیان می‌کند. در حالی که در مدل ارائه شده، پارامترهایی که به نوعی در میزان تنش برشی لازم برای گسترش ترک موثرند نظیر مدول یانگ و فشار جانبی و غیره به طور مستقل با سختی II سختی شکست در ارتباط هستند.

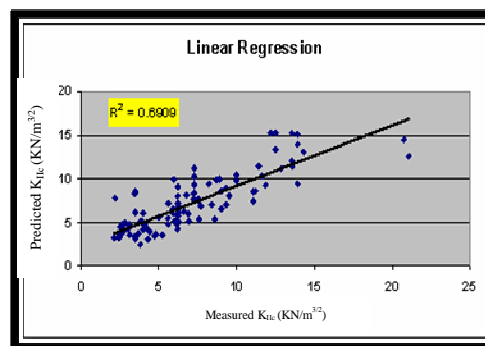
- پارامترهایی که برای آموزش شبکه استفاده شده‌اند، با توجه به میزان تاثیرگذاری بر روی مد II سختی شکست، و بر اساس سعی و خطا بدست آمده‌اند. نمونه‌ای از پارامترهای دیگر که در ابتدا در آموزش شبکه مورد استفاده قرار گرفته بودند، مد I سختی شکست ( $K_{Ic}$ ) می‌باشد که بر اساس تغییراتی که در شبکه ایجاد شد مشاهده گردید که چندان تغییری در روند شبکه ایجاد نمی‌کند. بنابراین همانطور که پیش‌بینی می‌شد رابطه‌ای با مد II شکست نمی‌تواند برقرار کند.

- در مدل آماری رگرسیون خطی مشاهده می‌شود که طول ترک لبه‌ای نمی‌تواند به صورت خطی با مد II سختی شکست ( $K_{IIc}$ ) رابطه برقرار کند که این مطلب، سختی برشی شکست بدست آمده از تابع تادا (فرمول ۲) را مورد تأیید قرار می‌دهد.

#### منابع

- [1] Stephansson, O.; 2002; "Recent rock fracture mechanics developments"; 1st Iranian rock mechanics conference, pp 675-698.
- [2] Brock D.; 1989; "Elementary Engineering Fracture Mechanics"; Kluwer Academic pub.
- [3] Qihua Rao, Stephansson O, Zongqi Sun, Chunlin Li, Stillborg B.; 2003; "Shrea fracture (Mode II) of brittle rock. Int J. Rock Mech"; Min Sci Geomech Abstr, , pp 355-375.
- [4] Stephansson O, Backers T, Rybacki E.; 2003; "Rock fracture toughness testing in Mode II- punch through shear test" Int J. Rock Mech. Min Sci Geomech Abstr, , pp 775-769.
- [5] Stephansson O, Backer T, Rybacki E.; 2001; "shear fracture mechanics of rocks and new testing method for  $K_{IIc}$ " In: S. arka P, Eloranta P, editors. Rock mechanics-a challenge for society. Proceeding of the

بر اساس تحلیل آماری رگرسیون خطی طراحی شد. بر اساس نتایج بدست آمده، این مدل نمی‌تواند رابطه خوبی با سطح معنا داری مناسب، بین سختی برشی شکست با نسبت ترک‌های لبه‌ای ( $a/w$ ,  $IP/w$ ) برقرار کند.



شکل ۲۲: برازش خطی برای مدل رگرسیون خطی

#### ۵- نتیجه‌گیری

مشکل اصلی در مطالعه سختی برشی شکست، نحوه بدست آوردن مقدار آن از طریق آزمایش می‌باشد. در سال‌های اخیر روش‌های مختلفی برای بدست آوردن سختی برشی شکست ارائه شده است که هر یک از این روش‌ها دارای نواقصی در تعیین دقیق و مستقیم مد II سختی شکست می‌باشند. از طرفی تهیه نمونه‌های مورد نیاز برای این آزمایش‌ها نیز بسیار مشکل، پرهزینه و مستلزم تجهیزات ویژه‌ای است. بنابراین از نتایج بدست آمده از آزمایش‌های پانچ و جعبه برش که برای تعیین مد II سختی شکست سنگ‌های مختلف بکار رفته است استفاده شد تا رابطه مناسبی بین سختی برشی شکست و پارامترهای موثر بر آن ایجاد شود. به همین منظور، شبکه عصبی مصنوعی برای ارتباط این پارامترها با مد II سختی شکست مورد استفاده قرار گرفت. در این تحقیق می‌توان به این نتیجه دست یافت که شبکه عصبی مصنوعی می‌تواند با سطح اطمینان قابل قبولی، برای پیش‌بینی سختی برشی شکست نمونه‌های سنگی مورد استفاده قرار گیرد. بنابراین:

- بر اساس مدل بدست آمده (مدل شبکه عصبی) به راحتی می‌توان با داشتن نوع سنگ، مدول یانگ، میزان فشار جانبی و طول ترک لبه‌ای، میزان سختی برشی شکست را برای نمونه‌های مختلف تخمین زد.
- روابط تجربی که توسط تادا و سایرین برای محاسبه مد برشی شکست ارائه شده است ارتباط بین طول ترک لبه‌ای و

ISRM Regional Symposium, EUROCK, 2001. Finland, pp163-168.

[6] Philippe, D.W.; 1997; "*Neural Network Models*", Springer-Verlag, London.

[7] Suchatvee, Suwansawat, Herbert H. Einstein; 2005; "*Artificial neural networks for predicting the maximum surface settlement caused by EPB shield tunneling*"; J.Tunnelling and Underground Space, pp133-150.

زیرنویس ها

- 
- <sup>1</sup> - Punch
  - <sup>2</sup> - Shear Box
  - <sup>3</sup> - Punch Shear Test
  - <sup>4</sup> - Shear Box
  - <sup>5</sup> - Backers
  - <sup>6</sup> - Dresen
  - <sup>7</sup> - Stephansson
  - <sup>8</sup> - Rybacki
  - <sup>9</sup> - Stillborg
  - <sup>10</sup> - Chunlin
  - <sup>11</sup> - Zongqi Suna
  - <sup>12</sup> - Qiuhua Rao
  - <sup>13</sup> - Over fitting
  - <sup>14</sup> - Pilot Experiment
  - <sup>15</sup> - Configuration correction factor
  - <sup>16</sup> - Westergaard stress function
  - <sup>17</sup> - Boukner weight function
  - <sup>18</sup> - Root Mean Square Error
  - <sup>19</sup> - Overtraining
  - <sup>20</sup> - Qiuhua Rao