

## تعیین ضریب بزرگنمایی جوش در اتصالات لوله‌ای به وسیله شبکه‌های عصبی مصنوعی

علی فتحی\*، علی‌اکبر آقا کوچک\*\* و غلامعلی منتظر\*\*\*

دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس

(دریافت مقاله: ۸۳/۳/۲۶ - دریافت نسخه نهایی: ۸۶/۶/۲۷)

چکیده - در اتصالات لوله‌ای جوشی زمانی که عمق ترک خستگی کمتر از ۲۰ درصد ضخامت جداره عضو اصلی است، رشد ترک بیش از هر چیز تحت اثر هندسه جوش در اتصال است. از این رو حل اتصال T شکل و ضریب بزرگنمایی جوش (Mk) ابزار مناسبی برای محاسبه سرعت رشد ترک در این محدوده‌اند. در این تحقیق توانایی شبکه‌های عصبی مصنوعی برای تعیین Mk در اتصالات T شکل مورد آزمون قرار گرفته است. چهار شبکه از نوع پرسپترون چندلایه (MLP) طراحی و آموزش داده شده‌اند تا مقادیر Mk را در عمیقترین نقطه ترک و نقاط انتهایی آنها تحت تنشهای غشایی و خمشی تخمین بزنند. داده‌های استفاده شده برای آموزش و آزمون شبکه‌ها از داده‌های معتبر اجزای محدود استخراج شده است. مقایسه بین نتایج به دست آمده از شبکه‌ها و جدیدترین روابط منتشر شده برای محاسبه Mk نشان‌دهنده قابلیت بالای شبکه‌های عصبی برای استفاده در این زمینه است.

واژگان کلیدی: اتصالات لوله‌ای - سکوه‌ای دریایی - ترک خستگی - مکانیک شکست الاستیک خطی - ضریب بزرگنمایی جوش - شبکه‌های عصبی مصنوعی

## Evaluating Weld Magnification Factor in Welded Tubular Joints Using Artificial Neural Networks

A. Fathi, A. A. Aghakuchak, and Gh. A. Montazer

Faculty of Engineering, Tarbiat Modarres University

**Abstract:** In welded tubular joints, when the fatigue crack depth is less than 20% of chord wall thickness, the crack growing process is highly affected by weld geometry. Hence, T-butt solution and weld magnification factor (Mk) are applicable tools for evaluating the crack growth rate in this domain. In this research, the capability of Artificial Neural Network (ANN) for estimating the Mk of weld toe cracks in T-butt joints is investigated. Four Multi-Layer Perceptron (MLP) networks are designed and trained to predict the Mk in deepest point and ends of weld toe cracks under membrane and bending stresses. Training and testing data of

\*\*\* - استادیار

\*\* - استاد

\* - کارشناس ارشد

networks are extracted from a reputable resource on finite element modeling. Comparison of the results obtained and those from the most recently published equations shows that using ANN seems to be very beneficial in this field.

**Keywords:** Tubular joint, Offshore platforms, Fatigue crack, Linear elastic fracture mechanics, Weld magnification factor, Artificial Neural Networks.

## فهرست علائم

Mk <sub>ma</sub>	ضریب بزرگنمایی جوش در عمیقترین نقطه ترک تحت تنش غشایی	a	عمق ترک
Mk <sub>mc</sub>	ضریب بزرگنمایی جوش در نوک ترک تحت تنش غشایی	c	نصف عرض ترک
N	تعداد سیکل تنش	DOB	ضریب میزان خمش
SCF	ضریب تمرکز تنش	K	ضریب شدت تنش
Y	ضریب اصلاح شدت تنش	Mk	ضریب بزرگنمایی جوش
Y <sub>b</sub>	ضریب اصلاح شدت تنش تحت تنش خمشی	Mk <sub>ba</sub>	ضریب بزرگنمایی جوش در عمیقترین نقطه ترک تحت تنش خمشی
Y <sub>b</sub>	ضریب اصلاح شدت تنش تحت تنش غشایی	Mk <sub>bc</sub>	ضریب بزرگنمایی جوش در نوک ترک تحت تنش خمشی

### ۱- مقدمه

می‌شود؛ به خصوص در حالتی که لازم باشد مقاومت سازه‌ها با وجود ترکهای خستگی در اتصالات آنها مورد ارزیابی قرار گیرند. در مکانیک شکست الاستیک خطی<sup>۴</sup> (LEFM) از قانون رشد ترک پاریس<sup>۵</sup> برای تعیین آهنگ رشد ترک استفاده می‌شود که در آن سرعت رشد ترک، علاوه بر جنس ماده حاوی ترک و شرایط پیرامونی آن، تابعی از ضریب شدت تنش<sup>۶</sup> (K) در محدوده مجاور نوک ترک است [۲]:

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \quad (1)$$

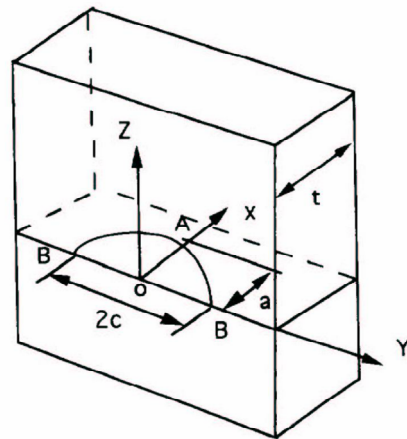
در مسائل خستگی، معیار ضریب شدت تنش یک معیار مناسب تشخیص داده شده است؛ چرا که اغلب خستگی در دامنه تنشهای پایین و تکرار زیاد رخ می‌دهد و شعاع پلاستیک رأس ترک بزرگ نیست [۳].

در تعیین سرعت رشد ترک خستگی در سکوه‌های دریایی با استفاده از مکانیک شکست، به علت درگیر بودن مسئله با برخی عوامل و پارامترهای تصادفی، امکان رسیدن به جوابهای قطعی وجود ندارد که بارزترین این عوامل ایجاد کننده عدم قطعیت و خطا را به صورت زیر می‌توان برشمرد [۱]:

سکوه‌های شابلونی<sup>۱</sup> متداولترین نوع سکوه‌های آبهای کم عمق و نیمه عمیق به شمار می‌روند. از میان بارهای محیطی وارد بر سکو، بار ناشی از امواج مهمترین باری است که در تمام طول عمر سازه بر آن وارد می‌شود. عبور امواج از سازه سکو باعث تغییر در تنشهای اعضای آن می‌شود و این تغییرات در درازمدت در اتصالات لوله‌ای سکوها پدیده خستگی را به همراه خواهد داشت. ترکهای خستگی در اتصالات لوله‌ای که به ترکهای سطحی نیمه بیضوی<sup>۲</sup> موسوم‌اند، از محل پنجه جوش و از سطح رویه آغاز می‌شوند و در جهت عمق جداره و حول مقطع اتصال رشد می‌کنند. پایان عمر خستگی یک اتصال لوله‌ای زمانی است که ترک به وجه دیگر جداره عضو اصلی<sup>۳</sup> برسد [۱].

علاوه بر منحنیهای S-N و روشهای مبتنی بر آن که به طور گسترده در طراحی سکوه‌های دریایی برای خستگی مورد استفاده قرار می‌گیرند، از روشهای مکانیک شکست نیز برای تعیین آهنگ رشد ترک و عمر خستگی باقیمانده اتصال استفاده

در این تحقیق سعی بر پیش‌بینی ضریب بزرگنمایی جوش با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی است. این ضریب برای تصحیح شدت تنش به دست آمده از حل ورق تخت و وارد کردن تأثیر هندسه جوش در محاسبه آهنگ رشد ترک در اتصالات لوله‌ای به کار می‌رود.



شکل ۱- ترک نیمه بیضوی سطحی واقع در ورق تخت

## ۲- استفاده از حل ورق تخت در اتصالات لوله‌ای

در استفاده از قانون پاریس مسئله اصلی محاسبه ضریب  $K$  است که با معادله زیر به تنش دوردست و ابعاد ترک مربوط می‌شود:

$$K = Y\sigma\sqrt{\pi a} \quad (2)$$

که در آن  $a$  بسته به نقطه مورد بررسی یک پارامتر اندازه ترک و  $Y$  ضریب اصلاح شدت تنش است که به صورت تحلیلی تنها برای هندسه‌های بسیار ساده قابل محاسبه است. در اتصالات لوله‌ای با توجه به پیچیدگی اتصال و نحوه بارگذاری و توزیع تنش در آن حل تحلیلی برای  $Y$  ممکن نیست. از این رو محققان روشهای مختلف دیگری را مثل روشهای اندازه‌گیری آزمایشگاهی، روشهای تجربی، روشهای عددی، روشهای اجزای محدود و حل‌های اصلاح شده ورق تخت، برای محاسبه آن مورد استفاده قرار داده‌اند [۳ و ۷].

روشهای حل ورق تخت از جمله روشهایی هستند که ابداع‌کنندگان با هدف کاربرد در تمام اتصالات و تحت هر شرایط بار، آنها را معرفی کرده‌اند. با استفاده از این روابط، طیف وسیعی از اتصالات و بارگذاریها قابل تحلیل و بررسی هستند. برای شرایط واقعی وجود یک ترک نیمه‌بیضوی در یک ورق تخت با ابعاد محدود، شکل (۱)، تحت تنش غشایی<sup>۸</sup> و خمشی<sup>۹</sup>، روابط متفاوتی بر پایه حل اجزای محدود پیشنهاد شده است که با استفاده از روشهایی مانند انتگرال جی در مکانیک شکست محاسبه شده‌اند. از مهمترین این روشها می‌توان به روابط نیومن - راجو [۸]، هولدبروکر - دور [۹] و اسکات - تورپ [۹] اشاره کرد که از بین آنها حل نیومن - راجو بیشترین کاربرد را در اتصالات لوله‌ای داشته است. این روش حاصل یک مطالعه گسترده اجزای محدود روی ترکهایی با شکلهای گوناگون

پیش‌بینی بارهای محیطی (شامل وجود خطا در تعیین امواج و حالات دریایی، شمارش سیکلها و دامنه تنش معادل).  
 تحلیل سازه‌ای (شامل وجود خطا در تعیین بارگذاری هیدرودینامیکی، پاسخ دینامیکی سازه و محاسبه تنش نقطه حاد).  
 پارامترهای موجود در مدل پیش‌بینی رشد ترک (شامل وجود خطا در تعیین ضریب شدت تنش، ضریب بزرگنمایی جوش<sup>۷</sup>، ضریب شدت تنش آستانه و ثابتهای پاریس).  
 فرایند ساخت و نگهداری (شامل وجود خطا در تعیین نقایص اولیه و تأثیر فرایند ساخت و نگهداری).  
 با توجه به عدم قطعیتها و مشکلات ذکر شده در زمینه بررسی رشد ترک در اتصالات لوله‌ای، رفع هر یک از این مشکلات در نیل به جوابهای بهتر مطلوب خواهد بود. در برخی از موارد بالا که به محاسبه سرعت رشد ترک در اتصالات لوله‌ای منجر می‌شود، تحقیقاتی در زمینه استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی صورت گرفته است که به عنوان نمونه به کار فاجدیگا و کلمنس [۴] برای شمارش سیکلهای تنش در حالت بارگذاری تصادفی، کار لوپز و ایکن [۵] در استفاده از شبکه‌های عصبی برای تعیین میزان تأثیر پاسخ دینامیکی سازه سکو در رشد ترک خستگی و یا کار چیو و همکاران [۶] در تعیین مقدار تنش حاد در اتصالات لوله‌ای XT می‌توان اشاره کرد که بیانگر تمایل محققان به آزمودن توانایی شبکه‌های عصبی مصنوعی در این زمینه است.

و تحت اثر تنشهای غشایی و خمشی است که به ارائه روابطی برای محاسبه مقادیر  $Y$  در نوک و عمیقترین نقطه ترک در یک ورق تخت تحت تنش خمشی و غشایی منجر شده است.

مقدار  $Y$  به دست آمده از حل نیومن - راجو به صورت زیر برای محاسبه ضریب شدت تنش در رابطه پاریس به کار می‌روند:

$$K = [Y_m(1-DOB) + Y_b.DOB] \sigma_{nom} \sqrt{\pi a} \quad (3)$$

که در آن  $Y_m$  ضریب اصلاح شدت تنش برای تنش غشایی،  $Y_b$  ضریب اصلاح شدت تنش برای تنش خمشی و  $DOB$  ضریب میزان خمش است.

علت رویکرد محققان به روشهایی با دامنه کاربرد وسیعتر مثل حل ورق تخت، بر این اساس استوار است که اتصالات لوله‌ای از لحاظ هندسه و الگوی بار انواع متنوعی دارند (حتی در یک دسته اتصال خاص، تغییرات ابعاد اعضای منتهی به آن می‌تواند تنوع زیادی تولید کند) و ارائه یک روش عمومی، طراح را از بررسی جداگانه هر اتصال بی‌نیاز می‌کند. اما باید توجه داشت که این روشها در عمل معمولاً با خطای بیشتری همراه هستند. علت وجود این خطاها ناشی از نگاه کلی این روشها به مسئله است؛ در واقع عمومیت، مستلزم جامعیت آنها نیست.

### ۳- نارساییهای حلهای ورق تخت در اتصالات لوله‌ای و روشهای اصلاحی آن

علت عدم تطابق حلهای ورق تخت و اتصالات لوله‌ای و به طور کلی علت عدم موفقیت محققان برای ارائه یک سری روابط که برای تمام اتصالات قابل کاربرد باشد، این است که رشد ترک خستگی در اتصالات لوله‌ای تحت تأثیر مستقیم عواملی است که نه تنها الگوی آنها در اتصالات لوله‌ای و ورق تخت متفاوت است؛ بلکه در اتصالات لوله‌ای نیز هر اتصال خاص تحت یک مد بارگذاری، طیف خاصی از این عوامل مؤثر را در بر می‌گیرد؛ به طوری که برای هر اتصال تحت یک بارگذاری مشخص باید به دنبال یک مکانیزم منحصر به فرد برای رشد ترک بود (شبیه راه حلهایی که برای به دست آوردن

تنشهای نقطه حاد متداول است). دلایل عدم تطابق حلهای ورق تخت و اتصالات لوله‌ای و راه‌حلهایی که توسط محققان برای رفع آنها پیشنهاد شده است، در ادامه بررسی می‌شود.

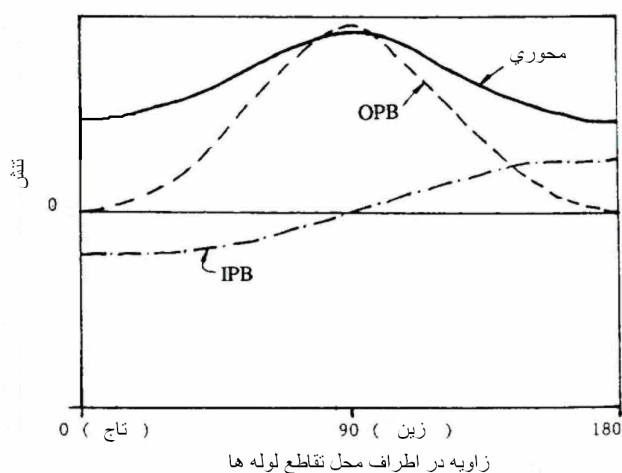
### ۳-۱- تأثیر شرایط مرزی و تغییر مسیر بار

این مورد بیشترین اثر را در ایجاد اختلاف جوابهای حل ورق تخت با حل اتصالات لوله‌ای دارد [۱۰]. اتصال لوله‌ای بر خلاف ورق تخت یک جزء سازه‌ای نامعین به شمار می‌رود که می‌تواند وجود ترک را در خود تحمل کند و ضمن رشد ترک به علت نامعینی سازه اتصال، مسیر انتقال بار تغییر یافته، بار از محدوده ترک نخورده منتقل شود. این امر یکی از دلایل عمده عدم افزایش سرعت رشد ترک در اتصالات لوله‌ای، ضمن بزرگ شدن ترک و کاهش مقطع بار است. بیشترین تأثیر پدیده بالا در حالت  $1/0 < a/T < 2/0$  است و با افزایش ابعاد ترک تأثیر تغییر مسیر بار نیز افزایش می‌یابد.

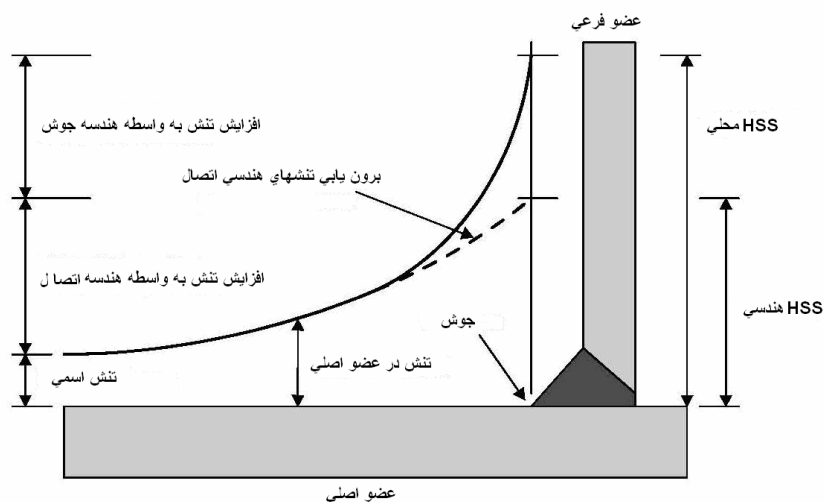
برای در نظر گرفتن تأثیر تغییر مسیر جریان بار نخستین مدل اصلاحی حل نیومن - راجو را آقا کوچک و همکاران [۱۱] ارائه کردند که به مدل آزاد سازی لنگر موسوم است. در این مدل تجربی تأثیر تنش خمشی به تدریج و به صورت خطی با افزایش عمق ترک کاهش می‌یابد و وقتی ترک سطحی تا عمق جداره نفوذ می‌کند، تأثیر تنش خمشی به کلی حذف می‌شود. فلسفه ارائه این مدل بر این اساس استوار است که اتصال لوله‌ای که یک اتصال کاملاً گیردار است با رشد ترک در جداره آن، تبدیل به اتصالی مفصلی می‌شود و قادر به عبور دادن تنش خمشی از محل ترک نیست. در نتیجه تنش خمشی از قسمتهای ترک نخورده عبور کرده، اثری در سرعت رشد نخواهد داشت.

### ۳-۲- تغییرات تنش حول مقطع اتصال

تنش در مقطع ترک نخورده یک ورق تخت تحت تنش غشایی و خمشی ناشی از بار دوردست در تمام عرض صفحه یکسان است؛ در حالی که در اتصال لوله‌ای مقادیر این تنشها و همچنین نسبت بین آنها در نقاط مختلف مقطع اتصال متفاوت



شکل ۲ - تغییرات تنش حول مقطع اتصال لوله‌ای T



شکل ۳ - تغییرات تنش در طول عضو منتهی به اتصال لوله‌ای

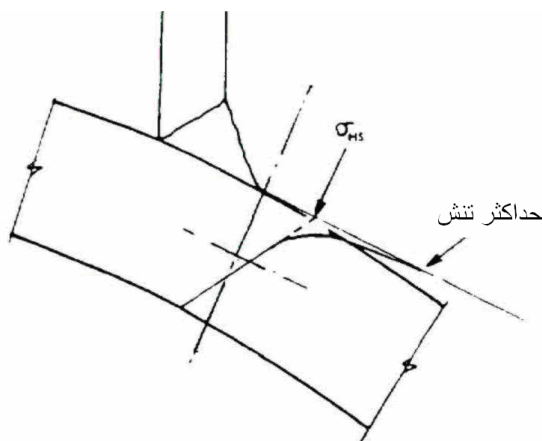
مقطع اتصال، می‌توان به مدل‌های موناهان و مایرز [۳] نیز اشاره کرد.

### ۳-۳- افزایش تنش ناشی از هندسه اتصال

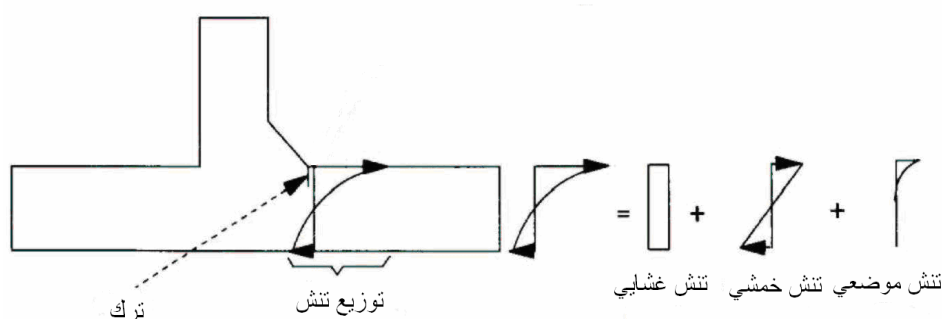
علت دیگر تفاوت حل ورق تخت با اتصال لوله‌ای افزایش تنش در طول المان منتهی به اتصال است. این افزایش همان طور که در شکل (۳) نشان داده شده است، اول به دلیل هندسه اتصال و دیگر به دلیل تأثیر هندسه جوش است [۱۰]. با توسعه روابط پارامتری برای محاسبه ضریب تمرکز تنش<sup>۱۱</sup> (SCF)

است. شکل (۲) تغییرات تنش را حول مقطع یک اتصال Y تحت سه مد بارگذاری نشان می‌دهد.

با بزرگ شدن ترک دو سر آن از محدوده‌های تنش حاد به نواحی با تنش کمتر در اتصال حرکت می‌کند و در نتیجه ترک در نواحی دو سر، تنش کمتری را تحمل می‌کند و سرعت رشد آن در طول کمتر می‌شود که باعث کم شدن سرعت رشد در عمق نیز می‌شود؛ البته تأثیر این مورد از تأثیر تغییر مسیر بار بسیار کمتر است [۱۰]. از مدل‌های معرفی شده برای اصلاح روش نیومن - راجو برای در نظر گرفتن تغییر تنش حول



شکل ۴ - تأثیر جوش در تغییرات تنش در عمق جداره عضو اصلی



شکل ۵ - تغییرات تنش در عمق جداره اتصال T

$$K = [Mk_m Y_m SCF(1 - DOB) + Mk_b Y_b SCF.DOB] \sigma_{nom} \sqrt{\pi a} \quad (5)$$

### ۳-۵- دخالت مدهای دوم و سوم بازشدگی ترک

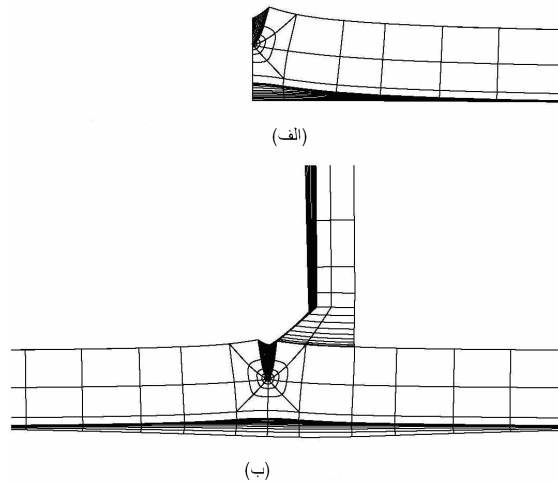
در ورق تخت، ترک ضمن رشد، تنها مد اول بازشدگی را تجربه می‌کند؛ در حالی که در اتصال لوله‌ای ممکن است ترک تحت اثر مدهای دوم و سوم نیز قرار گیرد. در این صورت تنش عمود بر مقطع عرضی دیواره ترک به تنهایی برای بیان  $K$  کافی نخواهد بود. البته مشاهدات آزمایشگاهی حاکی از آن است که در بیشتر اتصالات لوله‌ای به علت بالا بودن تنش خمشی مد غالب در رشد ترک همان مد اول است [۹]. همچنین انحنای ترک ضمن رشد و جهت‌گیری آن در زیر پنجه جوش به سمت عضو فرعی، تأثیر مد اول را بسیار بالا

در اتصالات تحت شرایط بارگذاری مختلف، معادله (۳) برای وارد کردن اثر هندسه اتصال به صورت زیر اصلاح شده است [۷].

$$K = [Y_m SCF(1 - DOB) + Y_b SCF.DOB] \sigma_{nom} \sqrt{\pi a} \quad (4)$$

### ۳-۴- تأثیر جوش در افزایش تنش

وجود جوش نیز به طور موضعی باعث افزایش نسبتاً زیاد تنش در طول و ضخامت المان می‌شود که این تأثیر در ترکهای با عمق کمتر از ۲۰ درصد عمق کل جداره، شدیدتر است [۱۰]، شکل (۴). از آنجا که توزیع تنش در عمق جداره اتصال T شکل شبیه اتصالات لوله‌ای است، شکل (۵)، برای رفع این ضعف روشهای حل اتصال T شکل توسعه داده شده‌اند که در آنها ضریب بزرگنمایی جوش ( $Mk$ ) محاسبه شده است و به صورت زیر برای محاسبه ضریب شدت تنش به کار می‌رود:



شکل ۶- مقطع ترک نیمه بیضوی در الف) ورق تخت ب) اتصال T شکل

$Mk = (K \text{ در همان ورق بدون قطعه الحاقی}) / (K \text{ در ورق با قطعه الحاقی})$

(۶)

علت توسعه روشهای اجزای محدود در مقایسه با روشهای آزمایشگاهی در این زمینه عدم دقت کافی دستگاههای موجود برای اندازه‌گیری ابعاد ترک در اعماق بسیار کم و ترکهای سطحی است. این در حالی است که محاسبه  $Mk$  برای این ترکها از اهمیت بیشتری برخوردار است. به غیر از نقیصه چهارم روشهای حل ورق تخت که در حلهای T شکل رفع شده است، نواقص دیگر حل ورق تخت را همچنان برای حل T می‌توان برشمرد؛ با این تفاوت که حل T برای ترکهای سطحی  $(0/2 < a/T < 0/0)$  در تمام اتصالات لوله‌ای قابل استفاده است. دلایل این امر را به صورت زیر می‌توان بیان کرد:

- ۱- تأثیرپذیری زیاد رشد ترک از هندسه جوش در ۲۰٪ اولیه ضخامت به دلیل وجود تمرکز تنشهای ناشی از جوش در لبه خارجی ضخامت جداره عضو اصلی.
- ۲- عدم وجود پدیده تغییر مسیر بار در ترکهای سطحی به دلیل اینکه وجود ترک در این ابعاد، سختی اتصال و در نتیجه توزیع تنش در آن را تحت تأثیر محسوسی قرار نمی‌دهد.
- ۳- عدم تأثیر محسوس نایکنواختی تنش حول ترک به دلیل کوچک بودن بدنه ترک در مقایسه با کل اتصال و وارد نشدن ترک به محدوده‌هایی با تنش خیلی کمتر از تنش نقطه حاد.

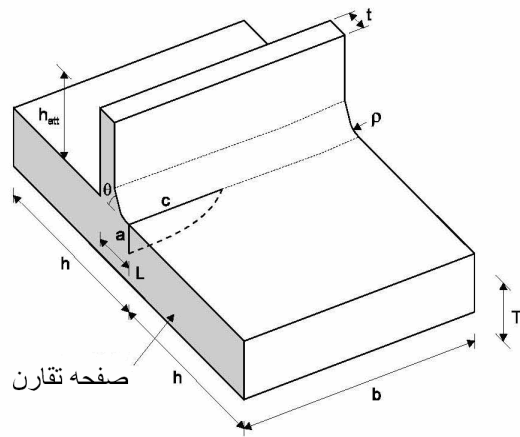
می‌برد [۱۲]؛ اما احتمال دخالت مدهای دوم و سوم به خصوص در اتصالات پیچیده و زمانی که ترک از یک محدوده وارد محدوده دیگر مانند سخت کننده حلقوی می‌شود، قابل توجه خواهد بود [۹].

### ۳-۶- رشد ترک تا انتهای ضخامت جداره

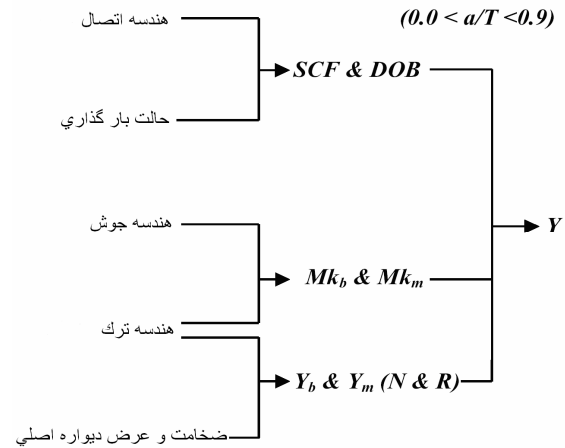
در اتصالات لوله‌ای به دلیل قابلیت بالای اتصال در تحمل ترک، امکان بررسی فرایند رشد تا رسیدن ترک به وجه دیگر جداره عضو اصلی وجود دارد؛ اما در ورقهای تخت معمولاً چنین امری به غیر از ورقهای بسیار عریض ممکن نیست و ورق قبل از رسیدن کامل ترک به وجه دیگر دچار شکست می‌شود. به همین دلیل حلهای مبتنی بر حل ورق تخت معمولاً برای  $a/T$  حد بالایی کوچکتر از یک دارند.

### ۴- روشهای حل اتصال T شکل و ضریب بزرگنمایی جوش (Mk)

عموماً اساس روشهای محاسبه  $Mk$ ، تهیه مدلهای عددی سه‌بعدی از اتصال T شکل حاوی ترک نیمه بیضوی در پنجه جوش و محاسبه ضریب Y در آنهاست.  $Mk$  برابر با نسبت Y در اتصال T شکل به Y در ورق تخت تحت شرایط یکسان ورق پایه حاوی ترک و هندسه یکسان ترک است، شکل (۶).



شکل ۸- پارامترهای هندسی ترک و جوش در اتصال T



شکل ۷- مراحل محاسبه ضریب شدت تنش با استفاده از حل T

## ۵- معرفی داده‌های استفاده شده برای آموزش و آزمون شبکه

دسته داده‌های انتخاب شده برای تخمین Mk توسط شبکه‌های عصبی مربوط است به بانک اطلاعاتی تهیه شده توسط بونس و لی [۱۰] که برای استخراج معادلات Mk تهیه شده است. این بانک محدوده نسبتاً کاملی از متغیرهای ورودی را شامل می‌شود. یک اتصال T شکل و پارامترهای هندسی موجود در آن در شکل (۸) نشان داده شده است. در این شکل a و c به ترتیب عمق و نصف طول ترک، L عرض تصویر قطعه الحاقی، θ زاویه جوش و شعاع پنجه جوش برای جوشهای سنگ‌زنی شده است.

لی پارامترهای  $a/T$ ،  $a/c$  و  $L/T$  را به عنوان متغیرهای ورودی برای محاسبه Mk در نظر گرفته است. برای  $a/T$  مقادیر ۰/۰۵، ۰/۰۱، ۰/۰۲، ۰/۰۴، ۰/۰۷، ۰/۱، ۰/۲، ۰/۳، ۰/۵، ۰/۷ و ۰/۹ در نظر گرفته شده است. برای نسبتهای عمق به عرض، مقادیر ۰/۱، ۰/۲، ۰/۴، ۰/۷ و ۱ انتخاب شده است که بیشتر معایب و ترکهایی را که در عمل یافت می‌شوند، پوشش می‌دهد. مقادیر  $L/T$  با توجه به توصیه‌نامه استاندارد AWS D1.1-90 برای جوشهای گوشه و همچنین محدوده هندسی کاربرد جوشهای گوشه در اتصالات لوله‌ای، برابر مقادیر ۰/۵، ۱/۲۵، ۲/۰ و ۲/۷۵ انتخاب شده است. زوایای ۳۰، ۴۵، ۶۰ و ۷۵ درجه برای زوایای

بنا به دلایل ذکر شده بولت و شیتانت [۱۲] استفاده از روشهای مناسب حل T را برای ترکهای با عمق کمتر از ۲۰٪ ضخامت جداره عضو اصلی به عنوان بهترین گزینه برشمرده است. در واقع تنها راه حلی که برای تمام اتصالات و تحت همه بارگذاریها قابل استفاده است، روش حل اتصال T در محدوده  $0/0 < a/T < 0/2$  است.

در شکل (۷) مراحل محاسبه سرعت رشد ترک در اتصالات لوله‌ای با استفاده از حل T نشان داده شده است.

از بین حلهای T می‌توان از روش Bell [۱۳] و روش محاسبه Mk برای ترکهای لبه خارجی اتصالات T شکل در PD6493 استاندارد بریتانیا [۱۴] نام برد. کاملترین جدیدترین روش محاسبه Mk روش بونس و لی [۱۵ و ۱۶] است که حاصل مدلسازی و حل گسترده مدل اجزای محدود اتصالات T شکل برای حالت‌های مختلف هندسه ترک و جوش و به دست آوردن معادلاتی برای محاسبه Mk در عمیقترین نقطه ترک و نوک ترک برای تنشهای غشایی و خمشی است. این معادلات در دو حالت پنجه جوش تیز و پنجه جوش هموار حاصل از سنگ‌زنی<sup>۱۲</sup> محاسبه شده است. بونس و لی در تحقیقات بعدی [۱۷ و ۱۸] سعی در استفاده از مدل T-butt خود برای بررسی رشد ترک در اتصالات لوله‌ای داشته‌اند.



## ۶- روند حل به کمک شبکه‌های عصبی

با توجه به مطالب بیان شده در قسمت‌های قبلی، در این قسمت ساختن و آموزش شبکه یا شبکه‌هایی مد نظر است که با دانستن مقادیر  $a/c$  و  $a/T$  (مشخصات ترک) و  $\theta$  و  $L/T$  (مقادیر مشخصه هندسه جوش)، ضرایب بزرگنمایی جوش را پیش‌بینی کند. به این ترتیب با داشتن مقادیر  $Y$  در این حالت می‌تواند از روش نیومن - راجو محاسبه شود، مقدار دامنه نوسان تنش و ثابت‌های پارسیس، سرعت رشد ترک در محدوده  $0/2 < a/T < 0/5$  قابل محاسبه خواهد بود.

شبکه انتخاب شده برای حل و مدل‌سازی از نوع پرسپترون چند لایه<sup>۱۴</sup> (MLP) با تابع محرک لگاریتمی زیگموئیدی برای تمام نرونها در لایه‌های مختلف است که از الگوریتم آموزش پس‌انتشار خطا برای آموزش آن استفاده شده است. در مورد معماری شبکه، ابتدا سعی بر آن بود که با ساختن تنها یک شبکه بتوان با توجه به داده‌های موجود، هر چهار ضریب بزرگنمایی جوش را پیش‌بینی کرد. برای این منظور شبکه‌هایی با چهار نرون در لایه خروجی ساخته شدند. پس از ساختن این شبکه و طی مراحل آموزش و آزمون در مورد آن، ملاحظه شد که جوابهای به دست آمده در حد مطلوب نیستند؛ به این معنی که یک شبکه نمی‌تواند برای هر چهار ضریب با یک معماری و یک تعداد چرخه یادگیری واحد به وضعیت بهینه برسد. این امر مؤید این موضوع است که فیزیک حاکم بر ضرایب بزرگنمایی جوش در حالات مختلف (عمق ترک، نوک ترک، تنش خمشی و تنش غشایی) با یکدیگر متفاوت است. در نتیجه برای پیش‌بینی هر یک از این ضرایب، یک شبکه مجزا ساخته شده است که هر یک تنها یک نرون در لایه خروجی دارد. تفاوت در شکل معماری شبکه‌های نهایی، جواب در مراحل پایان حل و تعداد سیکل‌های مختلف آموزش برای آن، مطلب فوق را تصدیق می‌کند.

از مجموع ۳۹۹ الگوی موجود دو سوم (۲۷۰ الگو) برای آموزش و یک سوم (۱۲۹ الگو) برای آزمون استفاده شده است. انتخاب داده‌ها با توزیع یکنواخت در کل داده‌ها انجام شده است و داده‌های حاوی پارامترهای بیشینه و کمینه در دسته آموزش

جوش در نظر گرفته شده است. زاویه  $30^\circ$  درجه در اتصالات T شکل کاربرد ندارد و برای تقریب حالتی که ترک در نقطه زینی اتصال لوله‌ای قرار می‌گیرد، در نظر گرفته شده است (در این نقطه برای مقادیر بالای  $\beta$  در اتصالات لوله‌ای، زاویه دوصفحه‌ای محلی<sup>۱۳</sup>، یک زاویه منفرجه است). در واقع لی این حالت را با مقادیر کم زاویه جوش تخمین زده است. وی برای مدل‌سازی از نمونه‌های با عرضهای مختلف استفاده کرده است تا بر خلاف لوله‌های ورق تخت، حل خود را از عرض ورق مستقل سازد.

تحلیلها برای هر ورق حاوی ترک یکبار با وجود قطعه الحاقی و جوش و یکبار بدون آن انجام شده است. مقادیر  $Y$  برای ترکیبی از چهار حالت مختلف وجود تنش غشایی، وجود تنش خمشی، در عمیقترین نقطه ترک و در نوک ترک، محاسبه شده‌اند. نرم‌افزار به‌کار رفته برای حل، ABAQUS بوده است و محاسبه ضریب تمرکز تنش با روش انتگرال جی صورت گرفته است. مقادیر مدول یانگ و ضریب پواسون برای همه نمونه‌ها به ترتیب برابر  $210 \text{ kN/mm}^2$  و  $0/3$  بوده است. نسبت  $Y$  به دست آمده از اتصال T-butt به  $Y$  مربوط به ورق تخت بیانگر ضریب بزرگنمایی جوش در هر یک از چهار حالت بالاست که منجر به محاسبه ضرایب زیر می‌شود:

- $Mk_{ma}$  ضریب بزرگنمایی جوش در عمیقترین نقطه ترک تحت تنش غشایی
  - $Mk_{ba}$  ضریب بزرگنمایی جوش در عمیقترین نقطه ترک تحت تنش خمشی
  - $Mk_{mc}$  ضریب بزرگنمایی جوش در نوک ترک تحت تنش غشایی
  - $Mk_{bc}$  ضریب بزرگنمایی جوش در نوک ترک تحت تنش خمشی
- که برای حالت جوش با پنجه تیز و منحنی شکل محاسبه شده‌اند. از بین داده‌هایی که به شرح بالا به دست آمده‌اند، داده‌های مربوط به حالت جوش پنجه تیز برای عمق ترک بین  $0/05$  و  $0/2$  برای حل شبکه‌های عصبی انتخاب شده‌اند. علت این انتخاب کارآمدی بیشتر حل T در این محدوده و وجود نواقصی که به آنها اشاره شد، برای محدوده  $0/2 < a/T < 1/0$  است.

جدول ۱- شبکه MLP برای پیش‌بینی  $Mk_{ma}$ 

تعداد لایه‌های نهان	۲
تعداد نرونهای لایه نهان اول	۹ نرون
تعداد نرونهای لایه نهان دوم	۷ نرون
تعداد سیکلهای آموزش	۱۵۰۰
خطا برای دسته داده‌های آموزش	Max = ۰/۸۴۰۸٪ Min = -۰/۸۲۰۶٪ RMS = ۰/۰۰۳۷ R = ۰/۹۹۹۹۷ MAE = ۰/۱۸۵۰٪
خطا برای دسته داده‌های آزمون	Max = ۰/۹۷۶۱٪ Min = -۱/۱۴۰۷٪ RMS = ۰/۰۰۴۴ R = ۰/۹۹۹۹۵ MAE = ۰/۲۳۴۴٪

جدول ۲- شبکه MLP برای پیش‌بینی  $Mk_{ba}$ 

تعداد لایه‌های نهان	۲
تعداد نرونهای لایه نهان اول	۱۵ نرون
تعداد نرونهای لایه نهان دوم	۵ نرون
تعداد سیکلهای آموزش	۲۷۵۰
خطا برای دسته داده‌های آموزش	Max = ۰/۶۷۶۲٪ Min = -۰/۵۲۴۴٪ RMS = ۰/۰۰۲۵ R = ۰/۹۹۹۹۹ MAE = ۰/۱۲۱۸٪
خطا برای دسته داده‌های آزمون	Max = ۰/۷۸۱۹٪ Min = -۰/۸۶۸۰٪ RMS = ۰/۰۰۸۹ R = ۰/۹۹۹۸ MAE = ۰/۳۷۱۱٪

جدول ۳- شبکه MLP برای پیش‌بینی  $Mk_{mc}$ 

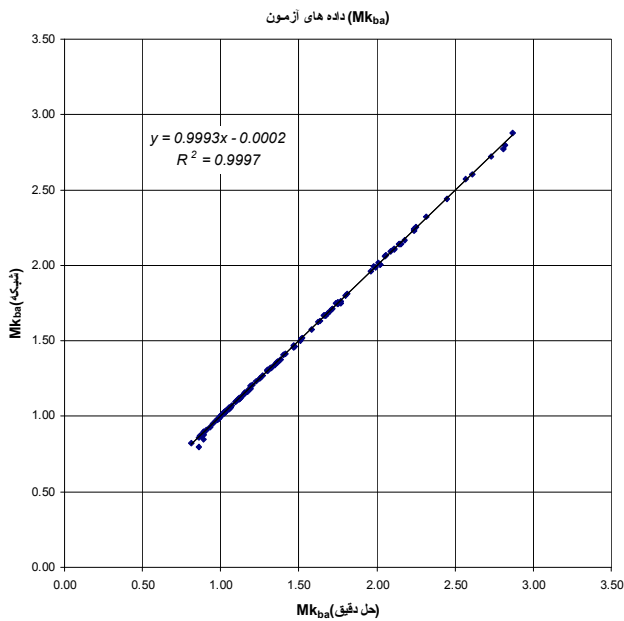
تعداد لایه‌های نهان	۳
تعداد نرونهای لایه نهان اول	۱۲ نرون
تعداد نرونهای لایه نهان دوم	۱۲ نرون
تعداد نرونهای لایه نهان سوم	۷ نرون
تعداد سیکلهای آموزش	۳۷۵
خطا برای دسته داده‌های آموزش	Max = ۱/۶۱۸۴٪ Min = -۴/۴۵۹۲٪ RMS = ۰/۰۲۷۸ R = ۰/۹۹۹۸۹ MAE = ۰/۵۷۸۲٪
خطا برای دسته داده‌های آزمون	Max = ۳/۵۲۴۱٪ Min = -۵/۱۷۹۴٪ RMS = ۰/۰۴۱۲ R = ۰/۹۹۹۵۷ MAE = ۰/۷۹۱۴٪

جدول ۴- شبکه MLP برای پیش‌بینی  $Mk_{bc}$ 

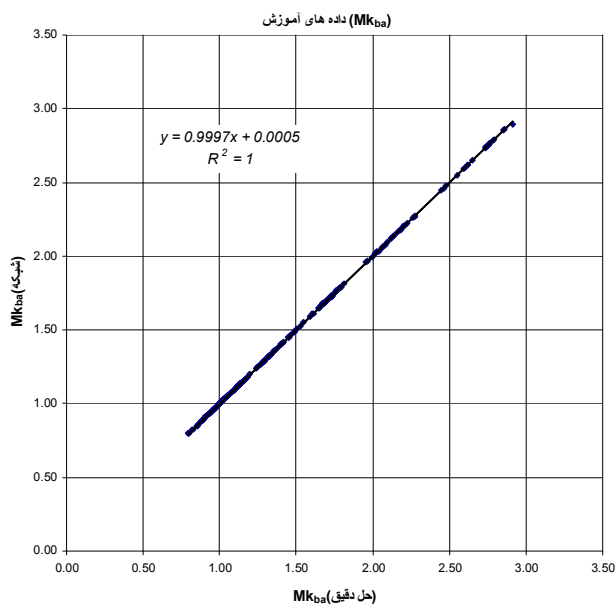
تعداد لایه‌های نهان	۳
تعداد نرونهای لایه نهان اول	۱۲ نرون
تعداد نرونهای لایه نهان دوم	۱۲ نرون
تعداد نرونهای لایه نهان سوم	۷ نرون
تعداد سیکلهای آموزش	۴۵۰
خطا برای دسته داده‌های آموزش	Max = ۳/۳۹۰۹٪ Min = -۴/۴۵۷۷٪ RMS = ۰/۰۲۶۱ R = ۰/۹۹۹۸۷ MAE = ۰/۶۶۹۲٪
خطا برای دسته داده‌های آزمون	Max = ۳/۹۴۱۶٪ Min = -۴/۸۸۴۴٪ RMS = ۰/۰۵۰۴ R = ۰/۹۹۹۴۷ MAE = ۱/۱۲۵۲٪

با دو لایه نهان برای محاسبه  $Mk_{ba}$  و  $Mk_{ma}$  و شبکه‌هایی با سه لایه نهان برای محاسبه  $Mk_{mc}$  و  $Mk_{bc}$  انتخاب شدند. در شکل‌های (۹) تا (۱۶) مقادیر واقعی در برابر مقادیری که شبکه‌ها پیش‌بینی کرده‌اند و خط برآزش داده شده بر این مقادیر نمایش داده شده است.

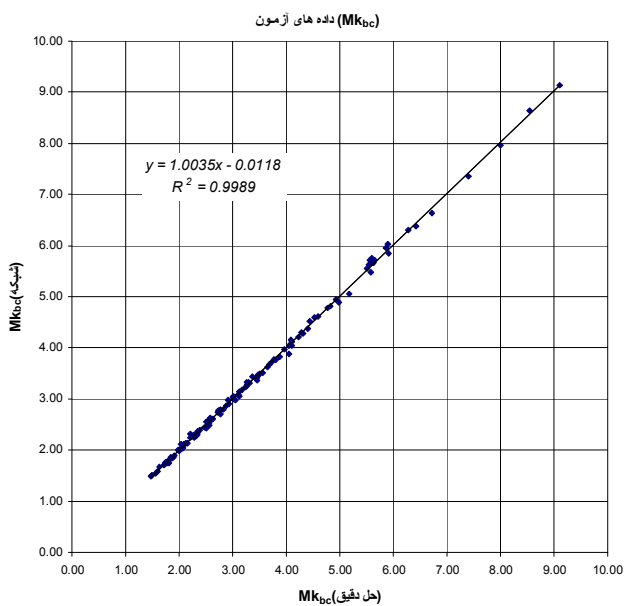
قرار گرفتند. انتخاب الگوهای آموزش و آزمون برای هر چهار ضریب به صورت یکسان انجام شده است. برای ساخت شبکه‌ها از بسته نرم افزاری NN در برنامه MATLAB استفاده شده است. مشخصات شبکه‌های انتخاب شده نهایی برای  $Mk_{ba}$ ،  $Mk_{ma}$ ،  $Mk_{bc}$ ،  $Mk_{mc}$  به ترتیب در جداول (۱) تا (۴) آمده است. شبکه‌هایی



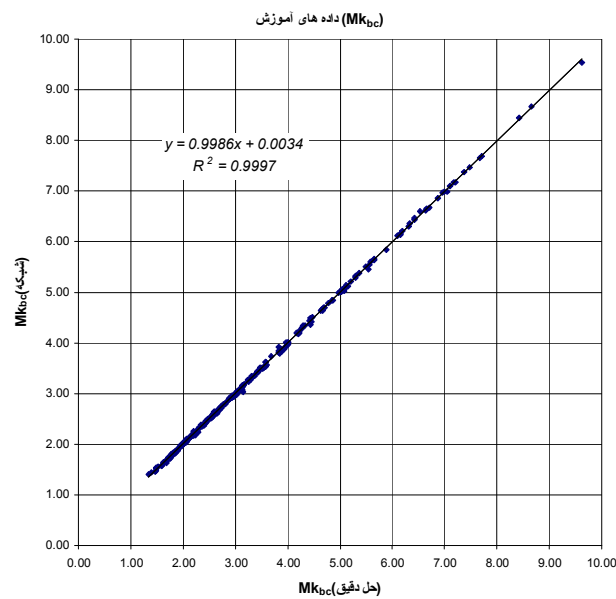
شکل ۱۰- مقادیر  $Mk_{ba}$  پیش‌بینی شده توسط شبکه MLP بهینه در برابر مقادیر حل دقیق در دسته داده‌های آزمون



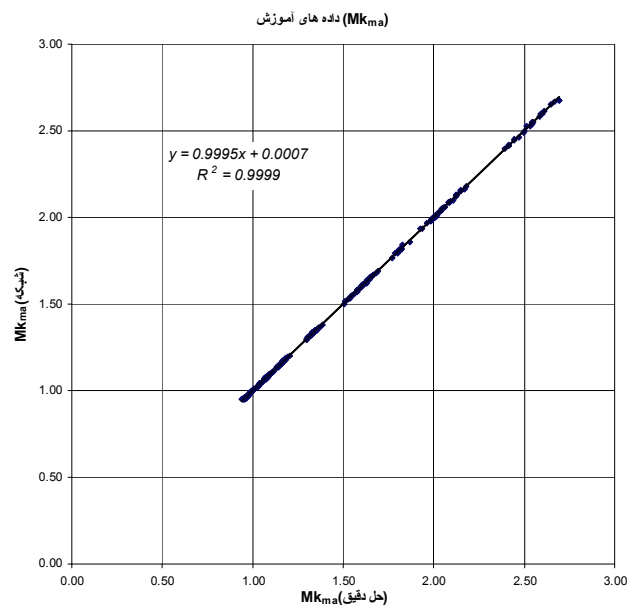
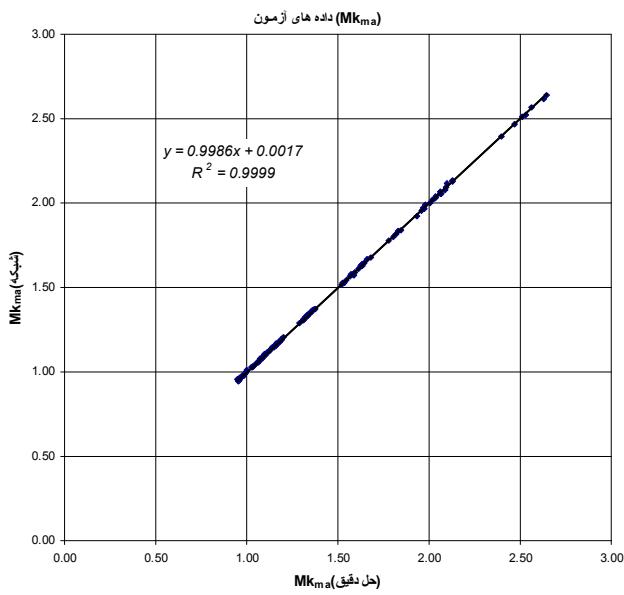
شکل ۹- مقادیر  $Mk_{ba}$  پیش‌بینی شده توسط شبکه MLP بهینه در برابر مقادیر حل دقیق در دسته داده‌های آموزش



شکل ۱۲- مقادیر  $Mk_{bc}$  پیش‌بینی شده توسط شبکه MLP بهینه در برابر مقادیر حل دقیق در دسته داده‌های آزمون

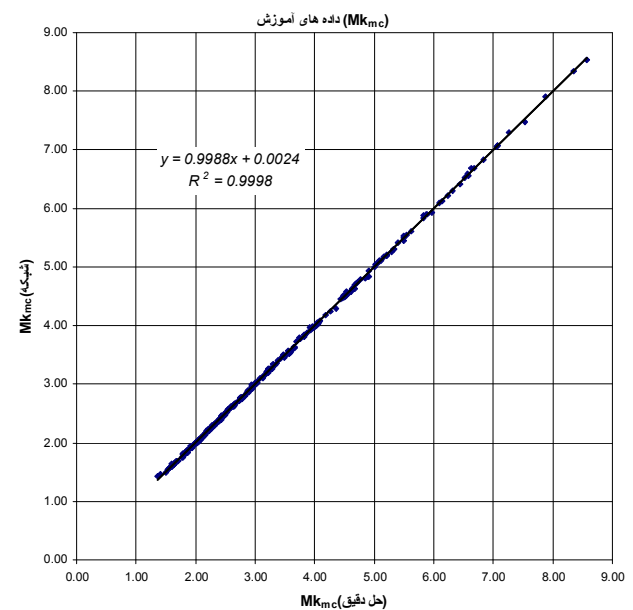
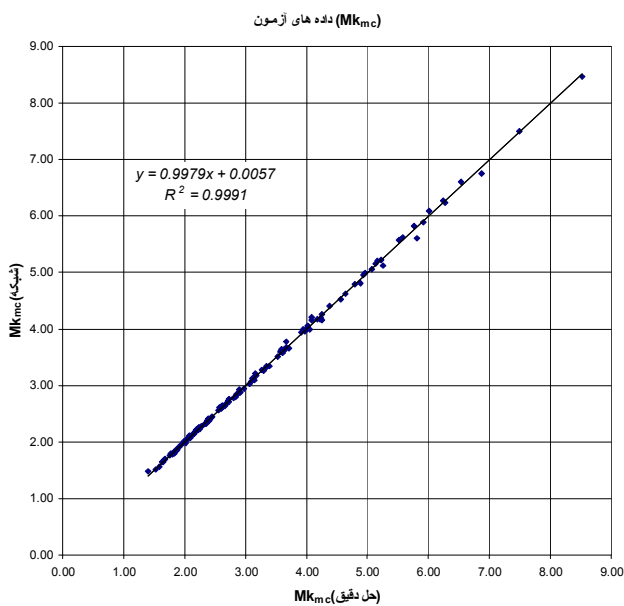


شکل ۱۱- مقادیر  $Mk_{bc}$  پیش‌بینی شده توسط شبکه MLP بهینه در برابر مقادیر حل دقیق در دسته داده‌های آموزش



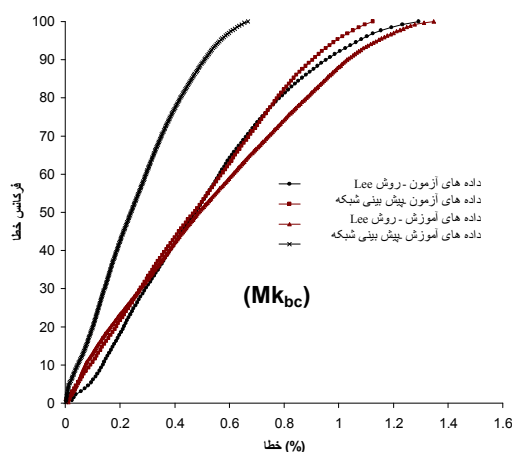
شکل ۱۴- مقادیر  $Mk_{ma}$  پیش‌بینی شده توسط شبکه MLP بهینه در برابر مقادیر حل دقیق در دسته داده‌های آزمون

شکل ۱۳- مقادیر  $Mk_{ma}$  پیش‌بینی شده توسط شبکه MLP بهینه در برابر مقادیر حل دقیق در دسته داده‌های آموزش

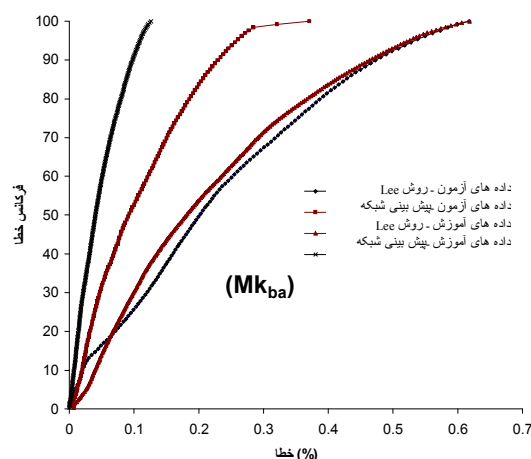


شکل ۱۶- مقادیر  $Mk_{mc}$  پیش‌بینی شده توسط شبکه MLP بهینه در برابر مقادیر حل دقیق در دسته داده‌های آزمون

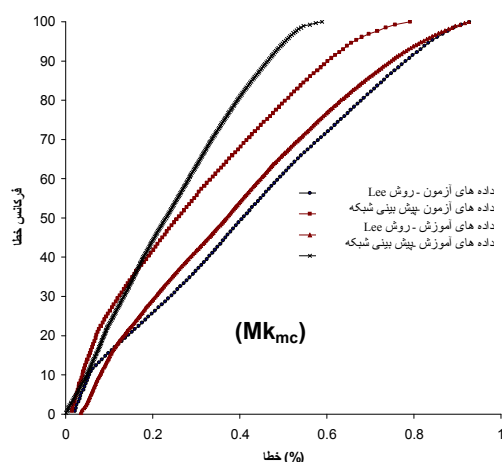
شکل ۱۵- مقادیر  $Mk_{mc}$  پیش‌بینی شده توسط شبکه MLP بهینه در برابر مقادیر حل دقیق در دسته داده‌های آموزش



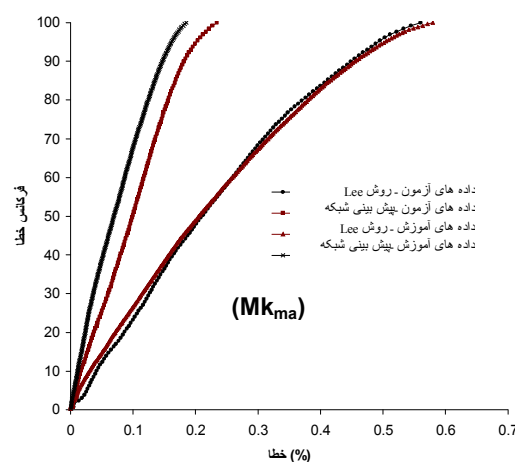
شکل ۱۸- مقایسه فرکانس خطا در پیش‌بینی  $Mk_{bc}$  توسط شبکه MLP بهینه و روش Lee-Bowness در داده‌های آموزش و آزمون



شکل ۱۷- مقایسه فرکانس خطا در پیش‌بینی  $Mk_{ba}$  توسط شبکه MLP بهینه و روش Lee-Bowness در داده‌های آموزش و آزمون



شکل ۲۰- مقایسه فرکانس خطا در پیش‌بینی  $Mk_{mc}$  توسط شبکه MLP بهینه و روش Lee-Bowness در داده‌های آموزش و آزمون



شکل ۱۹- مقایسه فرکانس خطا در پیش‌بینی  $Mk_{ma}$  توسط شبکه MLP بهینه و روش Lee-Bowness در داده‌های آموزش و آزمون

## ۷- مقایسه نتایج با معادلات بونس و لی

برای حصول اطمینان از کارآمدی شبکه‌ها، مقادیر فرکانس خطا برای داده‌های آموزش و آزمون شبکه و همان داده‌ها از معادلات لی محاسبه و در شکل‌های (۱۷) تا (۲۰) نشان داده شده است. همان‌طور که در این نمودارها نشان داده شده است، شبکه‌ها حتی برای داده‌های آزمون که اطلاعی از آنها نداشته‌اند، جوابهای بهتری از روش لی به دست داده‌اند؛ با وجود آنکه لی

با دقت در این شکل ملاحظه می‌شود که عرض از مبدأ آن نزدیک به صفر و ضریب زاویه این خط و نیز مجذور ضریب همبستگی در حد بسیار مطلوبی به یک نزدیک است که این امر نشان دهنده توانایی و قابلیت بالای شبکه در پیش‌بینی ضرایب مورد نظر است. این قابلیت به خصوص برای داده‌های آزمون به عنوان نماینده‌هایی از فضای حل که شبکه ضمن آموزش اطلاعی از آنها ندارد، بیشتر به چشم می‌خورد.

از همه داده‌ها برای به دست آوردن معادلات استفاده کرده است.

## ۸- نتیجه گیری

با توجه به انعطاف‌پذیری و توانایی بالای شبکه‌های عصبی مصنوعی در ردیابی الگوهای واقعی و مقاومت آن در برابر داده‌های توأم با اغتشاش و همچنین با توجه به نتایجی که از این تحقیق حاصل شد، می‌توان اذعان داشت که شبکه‌های عصبی مصنوعی قابلیت استفاده در تعیین ضریب بزرگنمایی جوش را در اتصالات T شکل دارند.

یکی از اختلافهای حل T با اتصالات لوله‌ای تفاوت در

زاویه دوصفحه‌ای محلی در این دو است. در اتصال T-Butt شکل مقدار این زاویه برابر ۹۰ درجه است؛ در حالی که در یک اتصال لوله‌ای بسته به ابعاد اعضای اصلی و فرعی و اینکه ترک در چه موقعیتی حول مقطع اتصال باشد، از ۹۰ (برای موقعیت تاج) تا ۱۸۰ درجه (ترک در نقطه زینی و در حالت  $\beta=1$ ) متغیر است. برای رسیدن به جوابهایی نزدیکتر به اتصالات لوله‌ای از طریق حل T، اضافه کردن این پارامتر به داده‌های ورودی در حل مسئله مناسب به نظر می‌رسد.

## واژه نامه

- |                                      |                              |                                 |
|--------------------------------------|------------------------------|---------------------------------|
| 1. jacket type                       | 6. stress intensity factor   | 11. stress concentration factor |
| 2. semi elliptical surface cracks    | 7. weld magnification factor | 12. grinding                    |
| 3. chord                             | 8. membrane                  | 13. local dihedral angle        |
| 4. linear elastic fracture mechanics | 9. bending                   | 14. multi layer perceptron      |
| 5. Paris                             | 10. load shedding            |                                 |

## مراجع

- Almore, A., Naess, (editors), *Fatigue Handbook-Offshore Steel Structures*, Tapir, Norway, 1985.
- Anderson, T. L. *Fracture Mechanics Fundamentals and Applications*, Second Edition, CRC Press, New York, 1994.
- Etube, L. S., *Fatigue and Fracture Mechanics of Offshore Structures*, Professional Engineering Publishing, London, 2001.
- Klemenc, J., and Fajdiga, M., "A Neural Network Approach to the Simulation of Load Histories by Considering the Influence of Sequence of Rainflow Load Cycles," *Int. J. Fatigue*, Vol. 24, pp. 1109-1125, 2002.
- Tiago A. Piedras Lopes, Nelson F. F. Ebecken, "In-Time Fatigue Monitoring Using Neural Networks," *J. Marine Structures*, Vol. 10, pp. 363-387, 1997.
- Chiew, S. P. Gupta, A., and Wu, N. W., "Neural Network-Based Estimation of Stress Concentration Factors for Steel Multiplanar Tubular XT-Joints," *J. Constructional Steel Research*, Vol. 57, pp. 97-112, 2001.
- Etube, L. S., Brennan, F. P., and Dover, W. D., "Review of Empirical and Semi-empirical Y Factor Solutions for Cracked Welded Tubular Joints," *J. Marine Structures*, Vol. 12, pp. 565-583, 1999.
- Newman, J. C., and Raju, I. S., "An Empirical Stress Intensity Factor Equation For the Surface Cracks," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol.12, No. 2, pp. 185-192, 1981.
- Aaghakouchak, A. A., "Fatigue Fracture Mechanics Analysis of Ring-Stiffened and Simple Tubular Joints for Offshore Structures," Ph.D. Thesis, University College of London, London, 1989.
- Lee, M. M. K., and Bowness, D., "Fracture Mechanic Assessment of Fatigue Cracks in Offshore Tubular Structures," *Health and Safety Executive*, London, 2000.
- Aaghakouchak, A., Glinka, G., and Daramavasan, S., "A Load Shedding Model for Fracture Mechanics Analysis of Fatigue Cracks in Tubular Joints," *Offshore Mechanics and Arctic Engineering (OMAE)*, PP. 159-165, 1989.
- Cheaitant, M. J., and Bolt, H. M., "Evaluation of Stress Intensity Factor Solutions for Offshore Tubular Joints," *Offshore Mechanics and Arctic Engineering Confrence*, 1996.
- Bell, R., "Stress Intensity Factor for Weld Toe Cracks in Welded T Plat Joints," Faculty of Engineering Carleton University, Canada, CANMENT Project 708803, 1987.
- PD U+93. Guidance Methods for Assessing the Acceptability of Flaws in Fusion Welded Structures, British Standards Institution, 1991.
- Bowness, D., and Lee, M. M. K., "Prediction of Weld Toe Magnification Factors for Semi-Elliptical Cracks

- in T-butt Joints,” *Int. J. Fatigue*, Vol. 22, pp. 369-387, 2000.
16. Bowness, D., and Lee, M. M. K., “Weld Toe Magnification Factors for Semi-Elliptical Cracks in T-butt Joints-Comparison with Existing Solution,” *Int. J. Fatigue*, Vol. 22, pp. 389-396, 2000.
17. Lee, M. M. K., and Bowness, D., “Estimation of Stress Intensity Factors Solution for Weld Toe Cracks in Offshore Tubular Joints,” *Int. J. Fatigue*, Vol. 24, pp. 861-875, 2002.
18. Lee, M. M. K., and Bowness, D., “Fatigue Life Prediction of Offshore Tubular Joints Using Fracture Mechanics,” *Fatigue and Fracture of Engineering Materials & Structures*, Vol. 25, 2002.