

## **Damage Detection in Strands of Post-Tensioned Tendon for Prestressed Concrete Bridges**

**O. Ranaei\*, S. Heydari**

### **Abstract**

Today, bridges play an important role in transportation networks, so that prestressed concrete bridges with post-tension tendon is one of the most common construction methods that have been prepared to meet the needs of infrastructure. These types of bridges are subject to various damages during operation, such as breakage in strands of tendons. Therefore, monitoring the status of their integrity during operation is of great importance. In this paper, a method based on axial strain changes in the wedge plate is used to identify strand breakage in post-tension tendons. Two wedge plate patterns, including 19- and 12-strand wedge plates, were modeled in ABAQUS software. Then, monitoring points were considered to identify the broken strand. Afterward, the performance of the damage detection framework based on axial strain changes was investigated by various wire breakage scenarios. The results show that the presence of breakage in strands of the tendon can be detected by observing distinct peaks at monitoring points. As the location of the damaged strand is closer to the monitoring points, the rate of axial strain changes will be more severe. Therefore, using the thresholds for each type of wedge plate, it is possible to identify the strand number that has been damaged in the post-tension tendon.

**Keywords:** Structural Health Monitoring, Prestressed Concrete Bridges, Damage Detection, Post-Tension Tendon, Wedge Plate

---

\*Corresponding author E-mail: [omid.ranaei94@gmail.com](mailto:omid.ranaei94@gmail.com)

## شناسایی آسیب در رشته‌های کابل فلزی پیش تنیده پس کشیده برای پل‌های بتنی پیش تنیده

امید رعنائی<sup>۱\*</sup>، سجاد حیدری<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری، دانشگاه تربیت مدرس

<sup>۲</sup> دکترای تخصصی عمران - زلزله

(دریافت: ۱۴۰۰/۱۱/۰۸، پذیرش: ۱۴۰۲/۰۳/۳۱)

### چکیده

امروزه پل‌ها نقش مهمی در شبکه‌های حمل و نقل ایفا می‌کنند به طوری که پل‌های بتنی پیش تنیده به روش پس کشیده یکی از رایج‌ترین روش‌های ساخت و ساز است که به منظور رفع نیازهای زیرساختی تهیه شده‌اند. از آنجا که این نوع پل‌ها در زمان بهره‌برداری تحت تأثیر آسیب‌های مختلفی مانند آسیب در رشته‌های کابل‌های فلزی پیش تنیده قرار می‌گیرند؛ لذا پایش وضعیت یکپارچگی آن‌ها در زمان بهره‌برداری از اهمیت بالایی برخوردار است. بنابراین در این مقاله برای شناسایی آسیب در رشته‌های کابل‌های فلزی پیش تنیده از روشی مبتنی بر تغییرات کرنش محوری در صفحه گوه استفاده شده است. بدین منظور ابتدا دو صفحه گوه ۱۹ و ۱۲ رشته‌ای در نرم افزار ABAQUS مدل شد و نقاط کنترلی برای پایش وضعیت در نظر گرفته شد. سپس با استفاده از سناریوهای آسیب منفرد و ترکیبی اقدام به بررسی عملکرد معیار شناسایی آسیب مبتنی بر تغییرات کرنش محوری شد. نتایج حاصل نشان می‌دهد که وجود آسیب در رشته‌های کابل فلزی به صورت تغییرات کرنش محوری و ایجاد یکسری قله در نقاط نظارتی می‌شود. به طوری که با نزدیک بودن محل رشته دچار آسیب شده به نقاط نظارتی، میزان تغییرات کرنش محوری شدیدتر خواهد بود. لذا با استفاده از آستانه‌های مطرح شده برای هر نوع صفحه گوه می‌توان شماره رشته‌ای که در کابل فلزی پیش تنیده دچار آسیب شده است را شناسایی کرد.

**کلید واژه‌ها:** پایش سلامت سازه‌ها، پل‌های بتنی پیش تنیده، شناسایی آسیب، کابل‌های فلزی پس کشیده، صفحه گوه

### ۱. مقدمه

روش پیش تنیدگی پس کشیده را به دو دسته پیوسته (Bonded) و غیر پیوسته (Unbonded) تقسیم کرد [۱]. این کابل‌ها در زمان بهره‌برداری تحت شرایط محیطی و ترافیکی دچار آسیب‌هایی از جمله خوردگی و خستگی می‌شوند. لذا در سیستم‌های پایش سلامت توصیه می‌شود که در ساخت پل‌های بتنی پیش تنیده از تکنیک پس کشیدگی غیر پیوسته استفاده شود. زیرا در این حالت بجای استفاده از مصالح گروت یا دوغاب سیمانی از مصالح منعطف مانند گریس استفاده می‌شود و در صورت وجود آسیب امکان تعویض رشته‌های کابل فلزی وجود دارد.

تکنیک‌های مختلفی برای شناسایی آسیب در کابل‌های فلزی پیش تنیده مانند بازرسی بصری [۲-۳]، رادیوگرافی [۴]، روش دینامیکی [۵-۹]، روش‌های مغناطیسی [۱۰-۱۳]، روش‌های الکتریکی [۱۴-۱۵] و روش‌های مبتنی بر انتشار امواج [۱۶-۲۰] ارائه شده است. بازرسی‌های بصری یکی از رایج‌ترین تکنیک‌های پایش سلامت است که بدون استفاده از تجهیزات تخصصی این عملیات صورت می‌گیرد. اما اگر محل کابل‌ها مدفون باشد، لازم

استفاده از کابل‌های فلزی پیش تنیده برای ساخت پل‌های بتنی یکی از تکنیک‌های رایج ساخت و ساز است زیرا از مزایای چشمگیری شامل کاهش اندازه اعضا، کنترل خیز و ترک، ساخت سریع پل و انعطاف پذیری طراحی برخوردار است [۱]. بسته به ترتیب کشش و مکانیزم انتقال نیروی کابل فلزی به بتن، پیش تنیدگی به دو دسته اصلی تقسیم می‌شود: پیش تنیدگی به روش پیش کشیده و پس کشیده. در پیش کشیدگی ابتدا کابل‌های فلزی توسط جک کشیده می‌شود و سپس عملیات بتن‌ریزی انجام می‌شود. در این حالت پس از اینکه بتن به مقاومت مشخصه رسید، کابل‌ها را از تکیه گاه‌های دو طرف آزاد کرده تا نیروی جک آزاد شود. اما در روش پس کشیده ابتدا عملیات بتن‌ریزی انجام شده و سپس کابل‌های فلزی توسط جک به میزان معینی کشیده می‌شود. در این حالت کابل‌ها درون غلاف قرار دارد و به منظور محافظت کابل‌های فلزی در برابر خوردگی معمولاً از مواد پرکننده استفاده می‌شود که بسته به نوع ماده پرکننده می‌توان

است که یکسری حفرات و مغزه زنی‌ها در محل‌هایی که احتمال وقوع پارگی است ایجاد شود که به دلیل ماهیت مخرب بودن آن باعث عوارض بیش‌تر می‌شود. روش رادیوگرافی با موفقیت در چندین برنامه برای ارزیابی غیر مخرب (NDE) و تشخیص نقص استفاده شده است. اما کاربرد آن در سازه‌های بتنی محدود شده است زیرا ماهیت ناهمگن بتن تمایل به پراکندگی اشعه X دارد. همچنین علاوه بر تجهیزات گران‌قیمت و اپراتورهای آموزش‌دیده، مشکلات دسترسی و خطر تشعشع چالش‌هایی است که برای کاربرد این روش وجود دارد. رویکرد مبتنی بر تحلیل مودال، وجود آسیب با استفاده از تغییرات در پاسخ ارتعاش دینامیکی شناسایی می‌شود. اما این رویکرد به تنهایی برای شناسایی محل آسیب کافی نیست و به شدت آسیب وابسته است. در روش‌های مغناطیس باقیمانده (RM)<sup>۱</sup> و نشت شار مغناطیسی (MFL)<sup>۲</sup> با استفاده از آهنربای الکترومغناطیسی اقدام به شناسایی آسیب می‌شود. زیرا در مجاورت یک نقص، به دلیل ناپیوستگی موضعی (نشت) باز توزیع دو قطبی مغناطیسی روی می‌دهد. اما گاهی اوقات میدان مغناطیسی اغلب توسط سایر عناصر فولادی تعبیه‌شده مختل می‌شود و تفسیر سیگنال را دشوار می‌کند. رویکرد مبتنی بر مقاومت الکتریکی براساس میزان مقاومت ظاهری برای عبور یک جریان متناوب است. وجود یک نقص یک مقاومت موازی را به سیستم وارد می‌کند که منجر به کاهش مقاومت معادل اندازه‌گیری شده بین رشته و فولاد تقویت‌کننده می‌شود. علی‌رغم مزیت اتصال الکتریکی ساده در صفحه گیره‌ها، ایجاد مقاومت ظاهری پایه ممکن است در کاربردهای عملی یک چالش باشد. روش‌های مبتنی بر انتشار موج براساس نحوه تولید موج و دریافت توسط سنسور آلتراسونیک به دو بخش آلتراسونیک و انتشار آکوستیک تقسیم می‌شود که در مقایسه با سایر روش‌ها بیش‌تر در سیستم‌های پایش سلامت سازه‌ها مورد استفاده قرار گرفته است اما مهم‌ترین محدودیتی که این روش دارد این است که نیاز به پردازش و فیلتر مناسب برای حذف نویز است و قادر به شناسایی محل شماره رشته دچار آسیب شده نیست. جدول ۱ مزایا و معایب روش‌های شناسایی آسیب در کابل‌های فلزی را نشان می‌دهد.

یکی از تکنیک‌های شناسایی آسیب در رشته سیم‌های کابل فلزی پیش‌تنیده، استفاده از تغییرات پاسخ کرنش در صفحه گوه پیش‌تنیده است. نتایج تحقیقات در مورد روش‌های موجود برای پایش وضعیت کابل‌ها بسیاری از محدودیت‌های آن‌ها از جمله مشکلات دسترسی برای قرار دادن و نصب سنسور، حساسیت به محیط و سر و صدا، پراکندگی زیاد داده‌های اندازه‌گیری شده،

<sup>1</sup> Remnant magnetism

<sup>2</sup> Magnetic flux leakage

جدول (۱). مزایا و معایب روش‌های شناسایی آسیب در کابل‌های فلزی

معایب	مزایا	تکنیک‌ها	روش‌های شناسایی آسیب کابل
- پارگی کابل بایستی به صورت فیزیکی قابل مشاهده باشد	+ سادگی		بازرسی بصری
- ماهیت ناهمگن بتن باعث پراکندگی اشعه X می‌شود. - تجهیزات گران قیمت، خطر تشعشع	+ جزء بازرسی‌های غیر مخرب است.		راديوگرافي
- ایجاد تغییرات در پارامترهای مودال به شدت وابسته به میزان آسیب است (عدم حساسیت نسبت به آسیب‌های کوچک). - عدم شناسایی محل آسیب	+ می‌تواند به طور کلی شناسایی کند که آیا آسیب در سازه رخ داده است یا نه.	استفاده از پارامترهای مودال	روش دینامیکی
- تحت تأثیر قرار گرفتن میدان مغناطیسی توسط عناصر فولادی تعبیه شده و نیاز به پردازش سیگنال است که نسبتاً از پیچیدگی بالایی برخوردار است.	+ به تعداد کمی سنسور مورد نیاز است.	مغناطیس باقیمانده (RM) نشت شار مغناطیسی (MFL)	روش‌های مغناطیسی
- تجهیزات گران قیمت (آنالیزگر مقاومت ظاهری) - عدم توانایی محل شناسایی آسیب	+ فقط در مکان‌های صفحه گیره نیاز به دسترسی است. + در پدیده‌های بدون پارگی کم‌تر تحت تأثیر قرار می‌گیرد.	روش مبتنی بر مقاومت الکتریکی (EMI)	روش‌های الکتریکی
- پردازش و فیلتر مناسب برای حذف نویز پس زمینه مورد نیاز است. - قادر به شناسایی آسیب در رشته نیست. نیاز به نظارت مستمر است.	+ در روش (AE) به تعداد کمی سنسور نیاز است و کافی است بر روی سطح بتن نصب شود	آلتراسونیک (GWUT) انتشار آکوستیک (AE)	روش‌های مبتنی بر انتشار موج (براساس نحوه تولید موج و دریافت توسط سنسور آلتراسونیک)

صفحات گوه که در صنعت پل استفاده می‌شود از نظر تعداد و الگوی رشته‌ها متفاوت است. روش پیشنهادی برای پایش وضعیت کابل‌ها به گونه‌ای طراحی شده است که رشته یا رشته‌های آسیب دیده را می‌توان با تعداد بهینه حسگر و با به حداقل رساندن فاصله سنسورها در صفحه گیره، اقدام به شناسایی آسیب نمود. در این بخش به ارائه یک چارچوب برای شناسایی آسیب در مجموعه رشته‌های کابل‌های فلزی پیش تنیده در صفحه گوه براساس روش پیشنهادی عبدالله و همکاران [۲۱] پرداخته می‌شود. به طوری که براساس پیچیدگی، تعداد و هندسه چیدمان رشته‌های کابل فلزی پیش تنیده در صفحه گوه، می‌توان دو الگوریتم شناسایی آسیب برای کابل‌های فلزی تعریف کرد.

۱. شناسایی آسیب براساس چیدمان مجموعه لایه‌های رشته‌های کابل فلزی (a layer-based method)

۲. شناسایی آسیب براساس مجموعه گروه‌های رشته‌های کابل فلزی (a group-based method)

معمولاً مدل شناسایی آسیب مبتنی بر لایه‌های رشته‌های کابل فلزی پیش تنیده، برای صفحات گوه بزرگ کاربرد دارد زیرا سنسورهای کم‌تری در مقایسه با تعداد رشته‌های کابل فلزی پیش تنیده وجود دارد؛ در حالی که مدل شناسایی آسیب مبتنی بر گروه‌های رشته‌های کابل فلزی، برای صفحات گوه کوچک با

عدم حساسیت نسبت به آسیب‌های نسبتاً کوچک مانند آسیب در سیم‌های کابل چند رشته‌ای و هزینه بالا را نشان می‌دهد. اگرچه پایش وضعیت کابل‌ها به روش آکوستیک در چندین برنامه پایش پل‌ها به اثبات رسیده است، اما این امر به روش‌های پیچیده فیلتراسیون، سازوکار دستیابی و پردازش داده‌های اختصاصی نیاز دارد به طوری که قادر به شناسایی آسیب در رشته آسیب دیده نیست. روش جدید مبتنی بر پاسخ کرنش صفحه گوه، بسیاری از محدودیت‌های فوق را پشت سر می‌گذارد و گزینه مناسبی برای تشخیص آسیب در رشته‌های کابل فلزی چند رشته‌ای است [۲۱].

در این پژوهش سعی شده است با استفاده از تغییرات کرنش محوری در صفحه گوه محل شماره رشته‌ای که در کابل فلزی پیش تنیده دچار آسیب شده است را شناسایی کرد. بدین منظور دو صفحه گوه ۱۹ و ۱۲ رشته‌ای در نرم افزار ABAQUS مدل شد. سپس با استفاده از نقاط کنترلی که در محیط پیرامونی صفحه گوه در نظر گرفته شد، می‌توان رشته دچار آسیب را شناسایی کرد. عملکرد این معیار شناسایی آسیب معرفی شده با استفاده از سناریوهای آسیب منفرد و ترکیبی مورد ارزیابی قرار گرفت.

## ۲. شناسایی آسیب در کابل‌های فلزی پیش تنیده پس کشیده غیر پیوسته

## ۲-۱. شناسایی آسیب براساس چیدمان مجموعه لایه‌های رشته‌های کابل فلزی ۱۹ رشته‌ای

یکی از چالش‌های اصلی در شناسایی آسیب مجموعه رشته‌های کابل فلزی پیش تنیده، الگوی توزیع رشته‌ها در صفحه گوه است. در صفحات گوه متقارن که توزیع رشته‌ها به صورت لایه‌های دایره‌ای شکل با فواصل مختلف از مرکز سطح گوه قرار گرفته است؛ از روش فوق مبتنی بر چیدمان مجموعه لایه‌ها استفاده می‌شود. به طور مثال در صفحات ۱۹ رشته‌ای که به صورت متقارن توزیع رشته‌ها قرار گرفته است؛ می‌توان مجموعه رشته‌ها را به صورت چند لایه با دواپر متحدالمرکز در نظر گرفت. در این حالت لایه‌های خارجی به دلیل نزدیک بودن به نقاط پایش از دقت بالایی برخوردار است. به این ترتیب، شکستگی در لایه‌های خارجی در مقایسه با لایه‌های داخلی، قله تیزتری را در نمودارهای تغییر کرنش ایجاد می‌کند. در واقع با استفاده از نمودار تغییرات ناهمسان کرنش می‌توان به وجود آسیب پی برد که برای شناسایی آسیب می‌توان از دو پارامتر استفاده کرد: حداکثر درصد تغییر کرنش (P) و حداکثر درصد نسبی تغییر کرنش (I). سپس این پارامترها با گروهی از آستانه‌های از پیش تعیین شده ( $\phi$ ،  $\gamma$ ،  $\lambda$ ،  $\mu$ ) مقایسه می‌شود تا رویکرد آسیب در کابل تأیید شود. از آنجا که هر رشته کابل فلزی پیش تنیده در فاصله متفاوتی از نقاط پایش کرنش قرار دارد، تغییرات کرنش محاسبه شده با فاصله بین نقاط پایش و رشته‌های کابل نرمال می‌شوند.

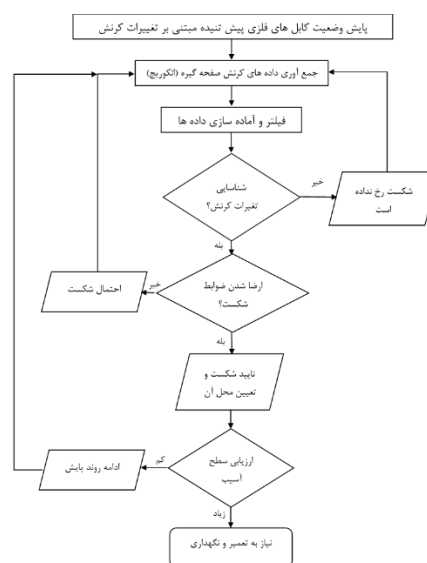
## ۲-۱-۱. نحوه سنسورگذاری

به منظور شناسایی آسیب در کابل‌های فلزی پیش تنیده ابتدا بایستی یک الگوریتم هندسی برای نحوه چیدمان رشته‌های کابل فلزی پیش تنیده مشخص شود. سپس با استفاده از عملیات سنسورگذاری (کرنش سنج‌ها)، مقدار تغییرات کرنش برای پایش وضعیت عملکرد کابل‌ها مورد بررسی قرار گیرد.

نحوه چیدمان رشته‌ها در صفحات گوه ۱۹ رشته‌ای به صورت لایه‌های دایره‌ای شکل متحدالمرکز است، که با فاصله شعاعی مختلفی از مرکز صفحه گوه قرار گرفته است (شکل ۲). لذا سطح صفحه گوه به چهار لایه تقسیم شده است؛ که لایه یک به عنوان بیرونی‌ترین لایه شامل رشته‌های ۱-۶، لایه دوم شامل رشته‌های ۷-۱۲، لایه سوم شامل رشته‌های ۱۳-۱۸ و لایه ۴ شامل رشته ۱۹ است. الگوی رشته در چنین صفحه گوه منجر به تعداد خطوط شعاعی منحصر به فرد می‌شود، زیرا چندین رشته مختلف لایه‌ها روی همان خط شعاعی قرار می‌گیرند. بنابراین فقط ۱۲ خط شعاعی برای ۱۹ رشته لازم است. برای به حداقل رساندن فاصله سنسور و رشته، سنسورها بایستی روی خطوط شعاعی

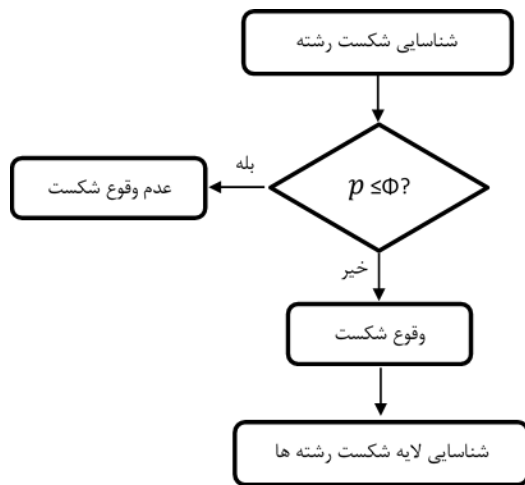
چیدمان عدم تقارن کاربرد دارد. بدین منظور می‌توان صفحات گوه را به دو دسته تقسیم کرد: (۱) صفحات گوه‌ای که کم‌تر از رشته‌های کابل، از کرنش سنج استفاده می‌شود (کابل‌های بزرگ‌تر). (۲) صفحات گوه‌ای که به تعداد رشته‌های کابل، از کرنش سنج استفاده می‌شود (کابل‌های کوچک‌تر).

شکل ۱ یک چارچوب پایش وضعیت کابل فلزی پیش تنیده با رویکرد مبتنی بر تغییرات کرنش نشان می‌دهد. هدف از این چارچوب، ارائه هشدارهای لازم برای هنگامی که شکست در رشته‌های کابل فلزی پیش تنیده رخ داده است. در این روش جمع‌آوری داده‌ها و پردازش آن به صورت خودکار است. در این چارچوب ابتدا یک صفحه گوه چند رشته‌ای با تعدادی کرنش سنج در نظر گرفته شده است؛ که کرنش‌های محوری را مطابق با یک برنامه از پیش تعیین شده برداشت می‌کند. این برنامه اندازه‌گیری می‌تواند به صورت روزانه یا هفتگی باشد و معمولاً در هنگام شب که بارهای ترافیکی و دما در پایین‌ترین حد خود است، اقدام به اندازه‌گیری کرنش می‌نماید. داده‌های کرنش صفحه گیره (انکوریج) برای مدت کافی برای گرفتن میانگین سطح کرنش در هر روز جمع‌آوری می‌شود. سپس داده‌های پردازش شده با داده‌های اولیه مورد مقایسه قرار می‌گیرد تا بتوان تشخیص داد که آیا تغییر کرنش قابل توجهی در سیستم صفحه گیره رخ داده است؟ که با این عمل می‌توان اقدام به شناسایی آسیب در کابل کرد. پس از تشخیص آسیب در کابل فلزی پیش تنیده، در مرحله بعد اقدام به شناسایی آسیب در رشته کابل می‌شود. در نهایت اقدام به ارزیابی میزان خسارت برای انجام عملیات بهسازی می‌شود.



شکل (۱). چارچوب پایش وضعیت کابل‌های فلزی پیش تنیده

لذا الگوریتم شناسایی آسیب را می‌توان به صورت زیر بیان کرد.



شکل (۳). الگوریتم پیشنهادی معیار شناسایی آسیب

### ۲-۱-۳. سناریوهای آسیب

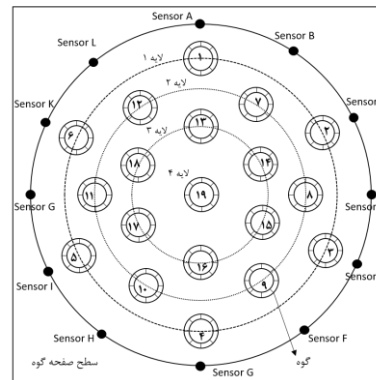
در این پژوهش به منظور شناسایی آسیب در کابل‌های فلزی پل‌های بتنی پیش تنیده به روش پس کشیده، روشی مبتنی بر تغییرات نسبی کرنش در محل گیره‌ها (anchorage) ارائه شده است. به این ترتیب می‌توان پارگی در رشته‌های کابل فلزی پیش تنیده را با مشاهده تغییر غیریکنواخت میدان کرنش بر روی منطقه گیره‌ها در مقابل تغییر یکنواخت کرنش‌ها تشخیص داد. روش این معیار شناسایی آسیب معرفی شده بدین صورت است که ابتدا یک مدل المان محدود براساس مشخصات گیره‌ها که در بخش قبل توضیح داده شد؛ تهیه می‌شود و کرنش محوری ایجاد شده در اطراف گیره‌ها (محل سنسورها) بدون هیچ آسیبی در کابل‌ها مورد محاسبه قرار می‌گیرد. سپس چند سناریو آسیب مختلف برای هر یک از کابل‌ها معرفی می‌شود. این سناریوهای آسیب می‌تواند به صورت پارگی منفرد در یک رشته کابل فلزی یا به صورت پارگی ترکیبی در چند رشته کابل فلزی باشد.

### ۲-۲. شناسایی آسیب براساس مجموعه گروه‌های

#### رشته‌های کابل فلزی (a group-based method) ۱۲ رشته‌ای

در این بخش یک الگوریتم کارآمد برای شناسایی خودکار رشته‌های آسیب دیده در کابل پیش تنیده فلزی ارائه می‌شود. این مدل با توجه به شرایط واقعی؛ مانند اثرات پارگی رشته (ها) بعدی کابل و محل قرارگیری گروه‌های مختلف در سطح صفحه گیره همراه با توزیع کرنش صفحه گیره در نظر گرفته شده است.

اتصال دهنده مرکز صفحه گوه و هر رشته قرار گیرند. لذا نقاط پایش بر روی محل تقاطع خطوط شعاعی با سطح محیطی صفحه گوه انتخاب می‌شود. لازم به ذکر است که در روش پیشنهادی می‌توان با استفاده از تغییرات کرنش‌های محوری اقدام به شناسایی آسیب در رشته‌های کابل فلزی پیش تنیده نمود.



شکل (۲). موقعیت کرنش سنسورها و رشته‌های کابل فلزی پیش تنیده ۱۹ رشته‌ای

### ۲-۱-۲. توسعه الگوریتم پیشنهادی

در شکل ۳ خلاصه مراحل مختلف با استفاده از پارامترهای معرفی شده و آستانه‌های مختلف، برای شناسایی آسیب در کابل‌های فلزی پیش تنیده ارائه شده است که به دنبال آن شرح الگوریتمی گام به گام ارائه می‌شود.

#### ۱. محاسبه حداکثر درصد تغییرات کرنش

بدین منظور حداکثر درصد تغییرات کرنش ( $p$ )، برای نقاط کنترلی مورد نظر براساس رابطه (۱) مورد محاسبه قرار می‌گیرد که  $i$  بیانگر تعداد نقاط کنترلی است.

$$p = \max(\Delta \varepsilon_i) \quad (1)$$

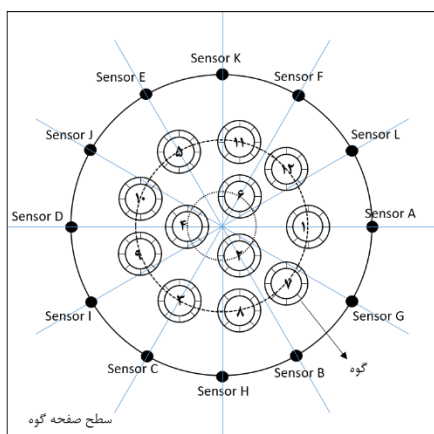
درصد تغییرات کرنش در نقاط کنترلی ( $\Delta \varepsilon_i$ ) براساس رابطه (۲) بیان می‌شود:

$$\Delta \varepsilon_i = \frac{(\varepsilon_i)_b - (\varepsilon_i)_a}{(\varepsilon_i)_b} \times 100 \quad (2)$$

که  $(\varepsilon_i)_a$  و  $(\varepsilon_i)_b$  به ترتیب مقدار کرنش نقطه کنترلی مورد نظر قبل و بعد از خرابی است.

#### ۲. ارزیابی وقوع خرابی در کابل‌های پیش تنیده

شناسایی آسیب با مقایسه بین حداکثر درصد تغییرات کرنش با مقدار آستانه مجاز  $\Phi$  به صورت زیر صورت می‌گیرد. به طوری که اگر حداکثر درصد تغییرات کرنش بیش از آستانه مجاز باشد در کابل فلزی پیش تنیده آسیب رخ داده است.



شکل (۴). موقعیت کرنش سنج‌ها و رشته‌های کابل فلزی پیش تنیده ۱۲ رشته‌ای

همانطور که در شکل ۴ مشاهده می‌کنید، ۶ گروه رشته داریم به طوری که  $G1$  بیانگر رشته ۱ و  $G2$  بیانگر رشته های ۷، ۲ و ۸ است. با توجه به نحوه گروه بندی رشته‌ها می‌توان ۶ نقطه کنترلی برای پایش وضعیت رشته‌ها در صفحه گوه معرفی کرد ولی به دلیل وجود مرز مشترک بین رشته‌ها لازم است ۶ نقطه کنترلی دیگر در میانه ۶ نقطه کنترلی اول در نظر گرفت. بنابراین تعداد کل نقاط نظارت شامل ۱۲ نقطه است که به ازای هر رشته سه محور شعاعی منحصر به فرد می‌توان در نظر گرفت. از طرف دیگر با توجه به نقاط کنترلی، برای هر رشته می‌توان سهم ۳ نقطه کنترلی نزدیک به آن را در نظر گرفت به عنوان مثال، برای رشته شماره ۱، از سه نقطه کنترل پایش  $L$ ،  $A$  و  $G$  ( $S1$ ) استفاده کرد و برای رشته شماره ۲، از سه نقطه کنترل پایش  $G$ ،  $B$  و  $H$  ( $S2$ ) می‌توان استفاده کرد. همانطور که در جدول ۲ نشان داده شده است، گروه سنسورهای  $2S$ ،  $3S$  و  $4S$  با ۸ گروه چند رشته‌ای  $2G$  مطابقت دارد. به طور مشابه گروه سنسور  $4S$ ،  $9S$  و  $10S$  با ۳ گروه چند رشته‌ای  $4G$  و گروه سنسور  $6S$ ،  $11S$  و  $12S$  با ۳ گروه چند رشته‌ای  $6G$  مطابقت دارد و بقیه گروه‌های سنسور  $1S$ ،  $3S$  و  $5S$  به ترتیب با گروه تک رشته‌ای  $1G$ ،  $3G$  و  $5G$  مطابقت دارد.

جدول (۲). مجموع تغییر کرنش نسبی در محل سه سنسور نزدیک به هر یک از رشته‌ها

$S1 = L + A + G$	$S7 = A + G + B$
$S2 = G + B + H$	$S8 = B + H + C$
$S3 = H + C + I$	$S9 = C + I + D$
$S4 = I + D + J$	$S10 = D + J + E$
$S5 = J + E + K$	$S11 = E + K + F$
$S6 = K + F + L$	$S12 = F + L + A$

مفهوم شناسایی آسیب در این روش بدین صورت است که بخشی از صفحه گوه در نزدیکی محل وقوع آسیب کرنش بیش تری در مقایسه با منطقه دورتر تجربه می‌کند. به طوری که تغییر کرنش نسبی در نقاط نظارتی، منجر به یک قله مشخص در نزدیک‌ترین نقطه نظارت در رشته آسیب دیده می‌شود و اندازه قله میزان آسیب بالقوه را نشان می‌دهد. لذا با توجه به نحوه توزیع رشته‌ها در صفحه گیره، یک الگوریتم پیشنهادی برای شناسایی آسیب صفحه گوه ۱۲ رشته‌ای پیشنهاد شده است. لازم به ذکر است که با توجه به نحوه توزیع رشته‌ها برخلاف روش قبل، از روش شناسایی آسیب مبتنی بر گروه‌های رشته‌ای استفاده شده است که در ادامه به توضیح آن می‌پردازیم.

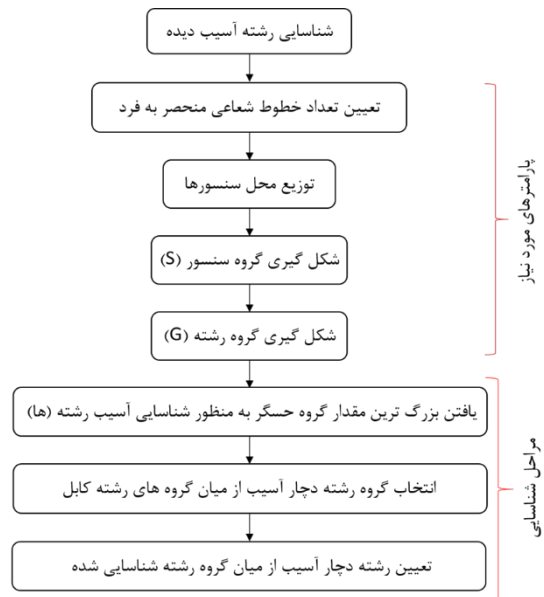
در برنامه پیشنهادی انتظار می‌رود که در اولین پارگی رشته کابل، باعث اوج تغییر کرنش در محل نزدیک حسگرها شود که به راحتی می‌توان رشته آسیب دیده را شناسایی کرد. با این حال عوامل مختلفی مانند پارگی‌های بعدی در رشته‌های دیگر کابل، نقص در محل گوه‌ها و تحمل صفحه گوه بر روی صفحه گیره باعث تغییرات تنش و در نتیجه تغییرات توزیع کرنش شود که نیاز به بررسی دقیق تر برای شناسایی آسیب در رشته‌های کابل است. در نتیجه به جای در نظر گرفتن تنها نزدیک‌ترین کرنش سنج نزدیک به رشته دچار آسیب دیده، لازم است ترکیبی از سنسورهای کمکی در نظر گرفته شود. در مدل پیشنهادی، نزدیک ترین و دو سنسور مجاور هر رشته یک گروه سنسور ( $S$ ) برای آن رشته تشکیل می‌دهد که رشته‌های موجود در یک بخش ( $G$ ) توسط یک گروه سنسور مورد پایش قرار می‌گیرد.

## ۲-۲-۱. اثرات الگوی گوه در صفحه گیره و تنظیم محل سنسورها (نقاط پایش)

به منظور شناسایی آسیب در صفحه گوه ۱۲ رشته‌ای ابتدا لازم است که نحوه چیدمان رشته‌ها در سطح صفحه گیره مورد بررسی قرار گیرد تا براساس آن نقاط نظارتی تعیین گردد. لذا براساس نحوه توزیع رشته‌ها، صفحه گوه را می‌توان به ۶ برش با زاویه ۶۰ درجه تقسیم کنیم که نقاط کنترلی  $G$ ،  $H$ ،  $I$ ،  $J$ ،  $K$  و  $L$  برای رشته‌های کابل فلزی پیش تنیده مشخص می‌شود. لازم به ذکر است که رشته‌های درون هر برش ۶۰ درجه یک گروه رشته را تشکیل می‌دهد. شکل ۴ نمای کلی تعیین نقاط کنترلی برای صفحه گوه ۱۲ رشته‌ای را نشان می‌دهد.

### ۲-۲-۲. توسعه الگوریتم پیشنهادی

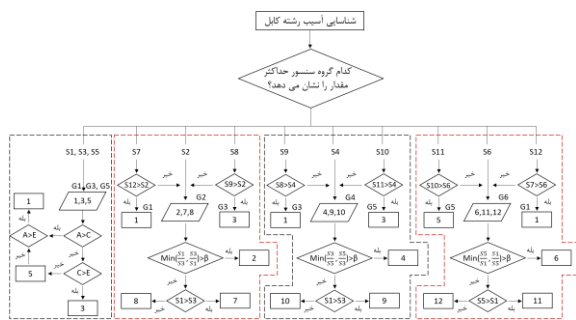
به منظور شناسایی پس از شکل‌گیری گروه‌های سنسور و رشته، نخستین مرحله یافتن گروه سنسوری است، که بیشترین تغییرات کرنش را تجربه می‌کند. سپس رشته مربوط به بزرگ‌ترین گروه سنسور و دو رشته مجاور آن برای شناسایی گروه (های) رشته دچار آسیب در نظر گرفته می‌شود. لذا با توجه به الگوریتم پیشنهادی می‌توان چارچوب کلی برای شناسایی آسیب در رشته‌های کابل فلزی پیش تنیده را در شکل ۵ مشاهده کرد.



شکل (۵). الگوریتم پیشنهادی برای شناسایی آسیب در صفحه گوه ۱۲ رشته‌ای

مقایسه می‌شود که نزدیک به واحد است. اگر ۱S بیشتر از ۳S باشد، رشته ۷ دچار آسیب شده است در غیر این صورت رشته ۸ دچار آسیب شده است. بنابراین همین روش را می‌توان برای گروه سنسور ۴S، ۹S و ۱۰S و گروه سنسور ۶S، ۱۱S و ۱۲S انجام داد.

در صورتی که گروه سنسور ۱S، ۳S یا ۵S بیشترین مقدار کرنش را تجربه کند، شکست در گروه تک رشته‌ای ۳،۱ یا ۵ رخ داده است. به منظور تعیین دقیق شکست رشته ۳،۱ باید دید که در کدام سنسور A، C یا E حداکثر کرنش تجربه می‌شود.



شکل (۶). فلوجارت شناسایی آسیب رشته در صفحه گوه ۱۲ رشته‌ای

### ۲-۲-۲. سناریوهای آسیب

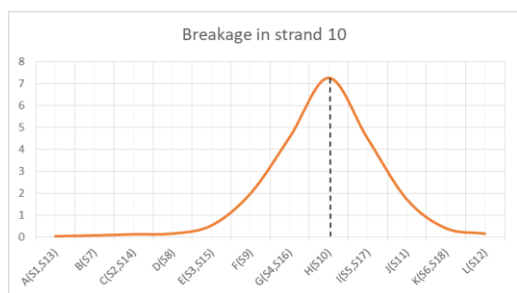
مدل پیشنهادی برای شناسایی آسیب در صفحه گیره ۱۲ رشته‌ای به گونه‌ای است که بایستی حداقل به اندازه رشته‌های کابل فلزی پیش تنیده، خطوط شعاعی تقسیم‌کننده وجود داشته باشد. بنابراین هر یک از خطوط شعاعی به عنوان یک نقطه پایش برای رشته‌های کابل فلزی پیش تنیده در نظر گرفته می‌شود. لذا حداقل نیاز به ۱۲ سنسور است که با استفاده از تغییرات کرنش در نزدیکی محل آسیب می‌توان آسیب را شناسایی نمود. در شرایط ایده‌آل اگر در یک رشته کابل فلزی دچار شکست شود، حداکثر تغییر کرنش به سادگی در نزدیک‌ترین محل کرنش سنج اتفاق می‌افتد که می‌توان آسیب را شناسایی نمود. که در الگوریتم پیشنهادی برای صفحه گوه ۱۹ رشته‌ای نشان داده شده است.

با این حال، در شرایط واقعی عوامل متعددی مانند پارگی متوالی در رشته‌های کابل فلزی پیش تنیده، نشست متفاوت قطعات گوه به دلیل نقص هندسی باعث تغییر در مکانیزم توزیع کرنش شود. در نتیجه برای شناسایی آسیب نیاز است که بجای در نظر گرفتن نزدیک‌ترین نقطه پایش (کرنش سنج) مشارکتی از نقاط پایش مجاور آن در نظر گرفته شود. لذا در این پژوهش برای بررسی کارایی الگوریتم پیشنهادی برای این صفحه گوه ۱۲

پس از شناسایی گروه حسگری که بیشترین تغییر کرنش را تجربه می‌کند، لازم است که براساس الگوریتم پیشنهادی در شکل ۶ اقدام به شناسایی آسیب در رشته کابل فلزی پیش تنیده شود. به طور مثال اگر گروه سنسور ۲S، ۷S یا ۸S بیشترین کرنش را تجربه کند، گروه رشته ۲G که شامل رشته‌های ۷،۲ و ۸ است در آن احتمال وقوع شکست است. اما بایستی رشته‌های مرزی ۱ و ۳ مورد بررسی قرار گیرد؛ به طوری که اگر گروه سنسور ۷S یا ۸S بیشترین کرنش را تجربه کند بایستی با استفاده از فلوجارت ذکر شده مقادیر گروه سنسور ۲S با گروه سنسور ۹S و ۱۲S مقایسه شود تا بتوان دید در کدام گروه سنسور ۱G، ۲G یا ۳G شکست رخ داده است.

در تعیین رشته دقیق درون گروه ۲G (۸،۷،۲) سنسورهای گروه ۱S (A، L، G) و ۳S (I، C، H) باید مقایسه شود. اگر رشته ۲ دچار آسیب شده باشد انتظار می‌رود گروه سنسور ۱S و ۳S تقریباً برابر باشد. زیرا این دو گروه سنسور فاصله یکسانی از رشته شماره ۲ دارد. بنابراین، نسبت بین ۱S و ۳S با آستانه  $\beta$

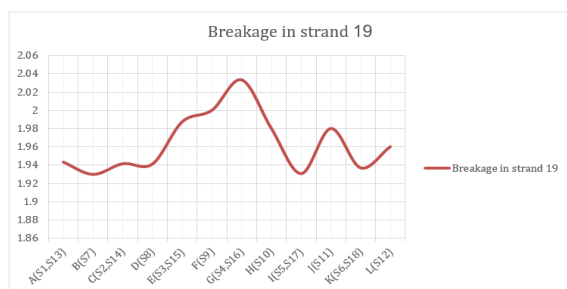




شکل (۷). درصد تغییرات کرنش محوری در نقاط پایش برای

سناریوی آسیب ۱

در سناریو آسیب ۲، اگر رشته مرکزی (۱۹) کابل فلزی پیش تنیده دچار آسیب شود، همه‌ی نقاط نظارتی به یک اندازه میزان تغییرات کرنش را تجربه می‌کنند و هیچ قله‌ای در نمودار تغییرات تنش مشاهده نمی‌شود. علت تغییر یکنواخت کرنش محوری این است که تمام نقاط نظارتی فاصله یکسانی از محل آسیب دارند. همانطور که در شکل ۸ مشاهده می‌کنید؛ برای سناریو آسیب ۲ که رشته مرکزی دچار آسیب شده است کلیه نقاط نظارتی تغییرات کرنش محوری در حدود ۱،۹۳ تا ۲ درصد را تجربه می‌کند که تقریباً میزان تغییرات کرنش محوری برای کلیه نقاط نظارتی یکسان است.



شکل (۸). درصد تغییرات کرنش محوری در نقاط پایش برای

سناریوی آسیب ۲

همانطور که در شکل ۹ مشاهده می‌کنید، میزان تغییرات کرنش محوری ناشی از پارگی در رشته های ۲ و ۱۷ کابل فلزی پیش تنیده را نشان می‌دهد (سناریو ۳ آسیب). همانطور که انتظار می‌رفت، یک تغییر کرنش محوری بزرگ در محل C به دلیل پارگی در رشته ۲ کابل فلزی روی داده است، بنابراین یک قله در محل C شکل گرفته است. در این سناریو حتی اگر پارگی دیگری در سایر رشته‌ها روی دهد باز هم می‌توان یافت، همانطور که در این سناریو در محل نقطه پایش I یک تغییر کرنش محوری دیگری روی داده است و به صورت قله نمایان شده است. از آنجا که ایجاد قله در محل I می‌تواند پارگی در رشته‌های ۵ یا ۱۷ باشد، لذا به منظور تشخیص آن دو سناریو آسیب (سناریو ۴ و ۵) تعریف شد. این سناریوها میزان تغییرات کرنش محوری در

رشته، ترکیبی از وقوع پارگی‌های پی در پی برای رشته‌های کابل فلزی پیش تنیده به عنوان سناریوی آسیب در نظر گرفته شده است.

سناریوی آسیب در نظر گرفته شده برای بررسی عملکرد الگوریتم پیشنهادی بدین صورت است که به ترتیب رشته ۳، ۲ و ۸ دچار آسیب شود. علت استفاده از این سناریو آسیب این است که علاوه بر تحقق اهداف ذکر شده در قسمت بالا، عملکرد الگوریتم برای گروه‌های طبقه‌بندی شده را بررسی می‌کند.

### ۳. نتایج و بحث

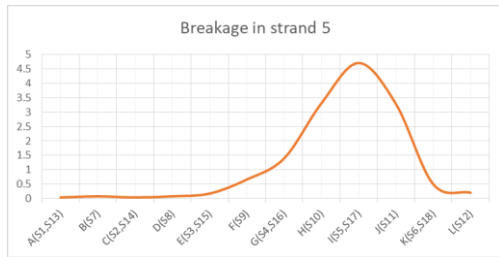
نتایج حاصل از تحلیل المان محدود برای هر یک از صفحات گوه ۱۹ و ۱۲ رشته‌ای با توجه به سناریوهای آسیب مختلف مورد بررسی قرار گرفت و با استفاده از تلیل‌های مربوط به هر یک از صفحات گوه، ضرایب مربوط به آستانه‌های پارگی مورد بررسی قرار گرفت.

#### ۳-۱. نتایج مدل المان محدود (FEM) برای صفحه گوه ۱۹ رشته‌ای

هدف از این مدل توسعه یافته بررسی قابلیت شناسایی آسیب در رشته‌های کابل فلزی پیش تنیده است که معمولاً در صنعت استفاده می‌شود. لذا با استفاده از چند نقطه پایش، میزان کرنش محوری صفحه گیره استخراج شده و با استفاده از الگوریتم پیشنهادی اقدام به شناسایی آسیب در صفحه گیره شد. لازم به ذکر است که مدل المان محدود (FEM) برای طیف گسترده‌ای از سناریوهای آسیب تهیه و تولید شد.

نتایج حاصل از این پژوهش نشان می‌دهد که به طور کلی، اوج تغییرات کرنش در نزدیک ترین محل پارگی رشته در محیط صفحه گیره اتفاق می‌افتد و شدت تغییرات کرنش با شدت آسیب افزایش می‌یابد. شکل ۷ نشان می‌دهد که حداکثر تغییرات کرنش در ۲۱۰ درجه مکانی از محور اصلی صفحه گوه رخ داده است که نزدیک ترین مکان آن رشته ۱۰ است که نشان گر آسیب در آن رشته کابل فلزی پیش تنیده است. به طوری که با افزایش شدت آسیب میزان تغییرات کرنش افزایش می‌یابد. لذا در جایی که نتایج همراه با تغییر شدید در میزان کرنش محوری همراه است، می‌توان وقوع پارگی را با استفاده از الگوریتم توسعه یافته شناسایی نمود. به طور مثال نقطه H که نزدیک ترین نقطه به رشته ۱۰ کابل فلزی پیش تنیده است (سناریو آسیب ۱)، بالاترین تغییر کرنش را تجربه می‌کند و پس از آن نقاط G و I که در مجاورت نقطه H قرار دارند، تغییرات کرنش را تجربه می‌کنند. به طوری که هرچه از محل آسیب دورتر شویم میزان تغییرات کرنش محوری کاهش می‌یابد.

آسیب ۴ میزان تغییرات کرنش محوری در حدود ۰.۲٪ بود. علت این موضوع این است که هر چه محل آسیب از نقطه‌های نظارت دورتر باشد میزان تغییرات کم‌تر است و ارتفاع قله‌های آن نسبت به محل‌های نظارت کوتاه‌تر است. با این وجود هر یک از آسیب در رشته‌های کابل فلزی به صورت قله نمایان می‌شود و هرچه میزان ارتفاع قله‌ها کم‌تر باشد، آسیب مربوط به رشته‌های لایه‌های درونی است.



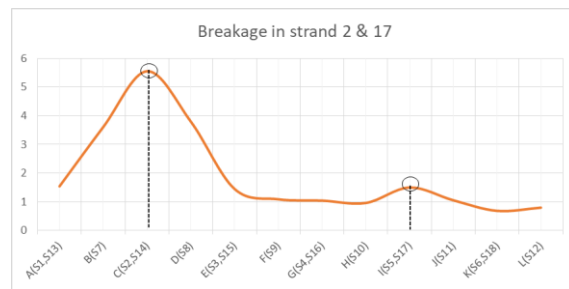
شکل (۱۱). درصد تغییرات کرنش محوری در نقاط پایش برای سناریوی آسیب ۵

### ۳-۱-۱. تعیین آستانه‌ها برای شناسایی آسیب

نتایج حاصل از تحلیل المان محدود نشان می‌دهد در صورت وجود آسیب در رشته‌های کابل فلزی، تغییرات کرنش محوری به صورت قله‌هایی در نقاط نظارتی نمایان می‌شود. حال اگر پارگی در رشته‌های کابل فلزی نزدیک به نقاط نظارتی باشد میزان تغییرات کرنش محوری بیش‌تر خواهد بود. بنابراین با توجه به سناریوهای آسیب معرفی شده و نتایج مربوط به آن، می‌توان نتیجه گرفت که اگر میزان تغییرات کرنش محوری برای هر یک از نقاط نظارتی بیش از ۱.۹ درصد باشد احتمال وقوع آسیب در رشته‌های کابل‌های فلزی پیش تنیده وجود دارد و بایستی عملیات کنترلی بیش‌تری صورت گیرد. بنابراین میزان  $\Phi$  (درصد تغییرات کرنش محوری) برای وقوع آسیب را می‌توان بین ۱.۹ تا ۲ درصد در نظر گرفت. حال برای شناسایی در رشته‌های کابل فلزی لازم است که سه پارامتر تحت عنوان  $\lambda$ ،  $\mu$  و  $\psi$  تعریف شود که هر یک از مقادیر به ترتیب بیانگر آستانه‌های پارگی رشته‌ها در لایه یک، دو و سه است. با توجه به سناریوهای آسیب معرفی شده و مدل‌های المان محدود برای هر یک از آن‌ها، اگر حداکثر تغییرات کرنش محوری را برای کلیه حالات استخراج کنیم و سپس عملیات نرمال‌سازی تغییرات کرنش برای هر یک از سناریوهای آسیب با توجه به حداکثر تغییرات کرنش انجام دهیم، متوجه می‌شویم که  $\gamma$  برابر یک،  $\lambda$  برابر ۰.۷، و  $\psi$  برابر ۰.۳ است. یعنی اگر حداکثر درصد تغییرات کرنش محوری برابر ۵.۵ درصد باشد و سپس عملیات نرمال‌سازی را با توجه به حداکثر درصد تغییرات کرنش محوری محاسبه کنیم اگر میزان تغییرات کم‌تر از ۰.۳ باشد احتمال وقوع شکست در لایه سه است و اگر میزان

فواصل نزدیک و دور از نقاط پایش نشان می‌دهد؛ که در ادامه به این نوع سناریوهای آسیب می‌پردازیم.

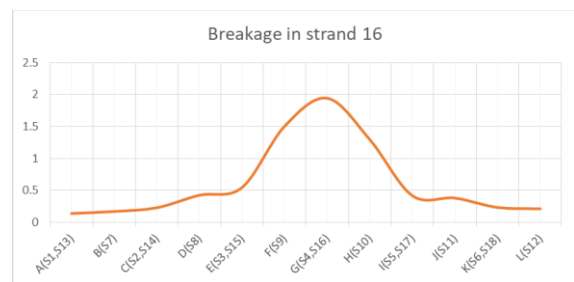
در این حالت مشاهده شده است که میزان تغییرات کرنش محوری در نقطه نظارتی C برای حالتی که پارگی در رشته شماره ۲ رخ دهد در حدود ۵.۵٪ است و برای حالتی که پارگی در رشته شماره ۱۷ رخ دهد میزان تغییرات کرنش محوری در نقطه نظارتی I در حدود ۱.۹ درصد است.



شکل (۹). درصد تغییرات کرنش محوری در نقاط پایش برای سناریوی آسیب ۳

هدف از سناریوهای آسیب شماره ۴ و ۵ این است که میزان تغییرات کرنش محوری در صورت وجود آسیب در رشته‌های کابل فلزی را متناسب با فاصله آن‌ها از نقاط نظارتی آن‌ها مورد بررسی قرار دهیم. لذا در سناریوی آسیب ۴، به بررسی آسیب در شماره رشته ۱۶ که فاصله دورتری نسبت به نقطه کنترلی G دارد مورد مطالعه قرار می‌دهیم.

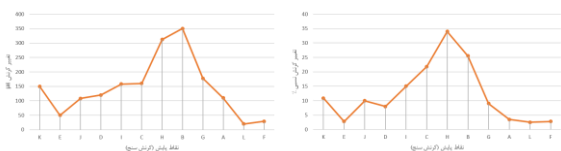
بر اثر پارگی در رشته ۱۶ کابل فلزی پیش تنیده تغییر کرنش محوری در حدود ۰.۲٪ مشاهده می‌کنیم در حالی که اگر پارگی در رشته شماره ۴ کابل فلزی رخ می‌داد، میزان تغییرات کرنش محوری در نقطه کنترلی G بیشتر خواهد بود.



شکل (۱۰). درصد تغییرات کرنش محوری در نقاط پایش برای سناریوی آسیب ۴

در سناریو آسیب ۵، به بررسی وجود آسیب در رشته ۵ کابل فلزی پیش تنیده پرداخته شده است. که در این حالت رشته مورد نظر فاصله کم‌تری به نقطه نظارتی I دارد. همانطور که در شکل ۱۱ مشاهده می‌کنید، میزان تغییرات کرنش محوری در نقطه نظارتی I در حدود ۴.۵ درصد است در حالی که در سناریو

۱۴ نشان داده شده است. براساس روش ذکر شده حداکثر تغییر کرنش در گروه سنسور فرعی ۸S رخ داده است که می‌توان با استفاده از الگوریتم پیشنهادی آسیب را در رشته ۸ شناسایی نمود.



شکل (۱۴). تغییرات کرنش پس از پارگی در رشته ۸ و ۳،۲

### ۲-۳-۱. تعیین آستانه‌ها برای شناسایی آسیب

نتایج حاصل از تحلیل المان محدود نشان می‌دهد که وجود آسیب در رشته‌های کابل فلزی پیش تنیده را می‌توان با استفاده از گروه سنسوری که میزان تغییرات کرنش محوری را اندازه‌گیری می‌کند، شناسایی کرد. ابتدا حداکثر گروه تغییر کرنش را شناسایی می‌کنیم و سپس گروه‌های سنسور مجاور آن را بررسی می‌کنیم و براساس شکل ۴-۱۸ گروه رشته‌ای که احتمالاً دچار آسیب شده است را می‌توان شناسایی کنیم. حال اگر میزان تغییرات کرنش محوری به سمت گروه‌های سنسور مجاور حرکت کند، احتمال وقوع شکست در دو رشته مجاور گروه‌های سنسور وجود دارد. حال اگر نسبت گروه دو سنسور مجاور در حدود ۰،۹۸ تا ۱ باشد، احتمال وقوع آسیب در رشته مرکزی گروه رشته وجود دارد. بنابراین میزان  $\beta$  برای این نوع صفحه گوه ۱۲ رشته‌ای در حدود ۰،۹۸ تا ۱ در نظر گرفته شده است.

### ۳-۳-۲. دستورالعمل اجرایی شناسایی آسیب در

#### کابل‌های فلزی پیش تنیده غیر پیوسته

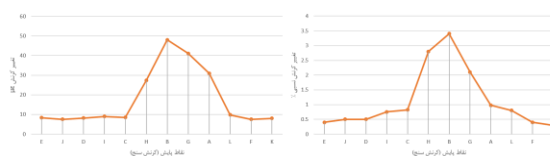
برای شناسایی آسیب در کابل‌های فلزی پیش تنیده ابتدا لازم است که آماده‌سازی لبه بیرونی صفحه گیره و نصب کرنش‌سنج‌های مقاومتی برای اندازه‌گیری کرنش محوری صورت گیرد. برای نصب کرنش‌سنج‌ها ابتدا بایستی عملیات اسیدشویی و حذف آلاینده‌ها از روی سطح مورد نظر صورت گیرد. لذا برای انجام این عملیات ابتدا به طور مثال یک صفحه گوه ۱۲ رشته‌ای از پل جناح را انتخاب می‌کنیم (شکل ۱۵ الف)). سپس لبه بیرونی صفحه گیره را با عملیات سمباده زنی و اسیدشویی عاری از هرگونه آلاینده می‌کنیم و کرنش‌سنج‌ها را بر روی لبه با استفاده از نقاط کنترلی که برای هر یک از صفحات گوه مطرح کردیم نصب می‌کنیم (شکل ۱۵ ب)). لازم به ذکر است از آنجا که برای نصب کرنش‌سنج‌ها در لبه بیرونی صفحه گیره عمقی در حدود ۲ سانتیمتر لازم است و از طرف دیگر لبه بیرونی صفحه گیره در حدود بیش از ۵ سانتیمتر از بتن فاصله دارد؛ لذا می‌توان کرنش‌سنج‌ها را در محیط پیرامونی صفحه گیره نصب کنیم. با

تغییرات بین ۰،۳ و ۰،۷ باشد، احتمال پارگی در رشته‌های لایه دو وجود دارد. لازم به ذکر است که اگر میزان تغییرات بیش‌تر از ۰،۷ و کم‌تر از ۱ باشد، احتمال وقوع پارگی در رشته‌های لایه اول وجود دارد.

### ۲-۳-۲. نتایج مدل المان محدود (FEM) برای صفحه

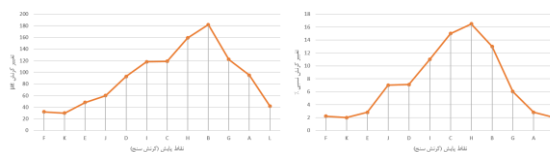
#### گوه ۱۲ رشته‌ای

با توجه به سناریوی آسیب معرفی شده، ابتدا تغییرات کرنش پس از وقوع پارگی در رشته ۲ مورد بررسی قرار گرفت و در شکل ۱۲ نشان داده شده است. نتایج حاصل نشان می‌دهد که پارگی در کابل ۲ باعث ایجاد تغییرات کرنش شدید در نزدیکی محل نقاط پایش (کرنش‌سنج) می‌شود. براساس الگوریتم پیشنهادی گروه سنسور ۲S که شامل نقاط پایش B، G و H است بیش‌ترین تغییرات کرنش را تجربه می‌کند. لذا بر اساس فلوجارت شکل ۶ احتمال وقوع شکست در رشته‌های ۱، ۲، ۳، ۷ و ۸ است که براساس چارت ذکر شده احتمال وقوع شکست در رشته ۲ است که براساس سناریوی آسیب در نظر گرفته شده، وقوع پارگی در رشته‌های کابل بر اساس الگوریتم پیشنهادی به درستی شناسایی شده است.



شکل (۱۲). تغییرات کرنش پس از پارگی در رشته ۲

براساس سناریوی آسیب تعریف شده، پس از وقوع آسیب در رشته شماره ۲، اقدام به ایجاد آسیب در رشته شماره ۳ کابل فلزی پیش تنیده شد. سپس تغییرات کرنش در صفحه گوه مورد بررسی قرار گرفت (شکل ۱۳). نتایج حاصل نشان می‌دهد که براساس الگوریتم پیشنهادی، حداکثر تغییرات کرنش در گروه سنسور اصلی ۳S یا گروه سنسوری مکمل ۸S رخ می‌دهد و براساس الگوریتم پیشنهادی در فلوجارت شکل ۱۴ می‌توان وقوع آسیب در رشته شماره ۳ را پیش‌بینی نمود که مؤید کارآمدی الگوریتم پیشنهادی است.



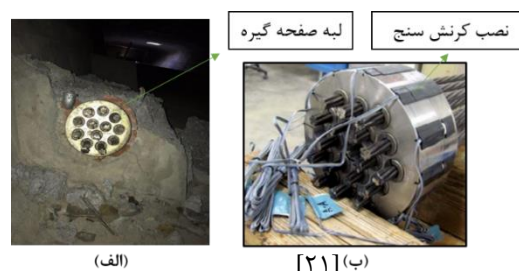
شکل (۱۳). تغییرات کرنش پس از پارگی در رشته ۲ و ۳

پس از وقوع آسیب در رشته‌های ۲ و ۳ اقدام به ایجاد پارگی در رشته شماره ۸ شد. نتایج حاصل از تغییرات کرنش در شکل

## ۵. مراجع

- [1] Corven, J. , Naito, C. , & Pessiki, S. (2018). Designing and Detailing Post-Tensioned Bridges to Accommodate Nondestructive Evaluation (No. FHWA-HIF-18-029).
- [2] Agdas, Duzgun, et al. "Comparison of visual inspection and structural-health monitoring as bridge condition assessment methods. " *Journal of Performance of Constructed Facilities* 30.3 (2016): 04015049.
- [3] Comisu, Cristian-Claudiu, et al. "Structural health monitoring system of bridges. " *Procedia engineering* 199 (2017): 2054-2059.
- [4] Ahlborn, T. M. , et al. "The state-of-the-practice of modern structural health monitoring for bridges: a comprehensive review. " (2010).
- [5] Yan, Y. J. , et al. "Development in vibration-based structural damage detection technique. " *Mechanical systems and signal processing* 21.5 (2007): 2198-2211.
- [6] Huseynov, F. , et al. "Bridge damage detection using rotation measurements—Experimental validation. " *Mechanical Systems and Signal Processing* 135 (2020): 106380.
- [7] Maeck, Johan, and Guido De Roeck. "Damage detection on a prestressed concrete bridge and RC beams using dynamic system identification. " *Key Engineering Materials*. Vol. 167. Trans Tech Publications, 1999.
- [8] Hu, Wei-Hua, et al. "Structural health monitoring of a prestressed concrete bridge based on statistical pattern recognition of continuous dynamic measurements over 14 years. " *Sensors* 18.12 (2018): 4117.
- [9] Astroza, Rodrigo. *Vibration-Based Health Monitoring and Mechanics-Based Nonlinear Finite Element Model Updating of Civil Structures*. University of California, San Diego, 2015.
- [10] Sun, Yanhua, et al. "Magnetic flux leakage structural health monitoring of concrete rebar using an open electromagnetic excitation technique. " *Structural Health Monitoring* 17.2 (2018): 121-134.
- [11] Wong, K. Y. , and Y. Q. Ni. "Structural health monitoring of a suspension bridge. " *Multi Science Pub.* , 2011.
- [12] Deza, Ursula M. *Development, evaluation and implementation of sensor techniques for bridges critical to the national transportation system*. Diss. Iowa State University, 2011.
- [13] Gao, Wei, Donglai Zhang, and Xueli Zhu. "Tension Monitoring and Defect Detection by Magnetostrictive Longitudinal Guided Wave for Fine Wire Rope. " *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* 70 (2021): 1-7.
- [14] Yang, Yaowen, Yee Yan Lim, and Chee Kiong Soh. "Practical issues related to the application of the electromechanical impedance technique in the structural health monitoring of civil structures: I. Experiment. " *Smart Materials and Structures* 17.3 (2008): 035008.

توجه به ماهیت پژوهش، این الگوریتم شناسایی آسیب برای کابل‌های فلزی پیش تنیده غیر پیوسته کاربرد دارد. لذا پیشنهاد می‌شود که در سیستم پل‌های بتنی پیش تنیده به جای استفاده از گروت یا دوغاب برای پر کردن غلاف‌های کابل فلزی پیش تنیده، از گریس استفاده شود؛ تا بتوان علاوه بر بهره بردن از مزایای سیستم گروت یا دوغاب، امکان تعویض رشته‌های کابل فلزی پیش تنیده را فراهم ساخت. همچنین پیشنهاد می‌شود که بخشی از محیط پیرامونی صفحه گوه در هنگام ساخت پل‌های بتنی پیش تنیده با استفاده از کپ‌های قابل تعویض (پوشش‌های پلیمری) پوشش داده شود. برای برداشت داده‌ها، ابتدا بایستی کرنش سنج‌ها را در راستای محوری صفحه گیره بر کنار لبه‌های آن نصب کنیم. پس از قرارگیری کرنش سنج در محل خود با استفاده از چسب یک دو سه در محل مورد نظر نصب می‌کنیم و پس از آن با ورق‌هایی از جنس مواد نارسانا یا پلاستیکی به طوری که بر محل سنسور فشاری وارد نشود، از آسیب‌های احتمالی محافظت می‌کنیم. پس از نصب کرنش سنج‌ها با استفاده از یک برنامه از پیش تعیین شده بر اساس فلوجارت پیشنهادی (شکل ۱) اقدام به برداشت داده‌ها می‌شود تا بتوان آسیب مورد نظر در رشته‌های کابل فلزی پیش تنیده را شناسایی نمود.



شکل (۱۵). نحوه نصب کرنش سنج روی صفحه گوه

## ۴. نتیجه‌گیری

در این پژوهش اقدام به ارائه روشی مبتنی بر تغییرات کرنش در صفحه گیره برای شناسایی آسیب در رشته‌های کابل فلزی پیش تنیده شده است. به منظور بررسی عملکرد و کارایی معیار شناسایی آسیب معرفی شده، ابتدا یک صفحه گیره ۱۹ رشته‌ای با استفاده از سناریوهای آسیب مختلف (منفرد-ترکیبی) مورد ارزیابی قرار گرفت. سپس اقدام به ارزیابی عملکرد معیار شناسایی معرفی شده با استفاده از سناریوهای آسیب مختلف شد. پس از تأیید الگوریتم پیشنهادی، اقدام به شناسایی آسیب در صفحه گیره ۱۲ رشته‌ای برای پل جناح شد. نتایج حاصل نشان می‌دهد که الگوریتم پیشنهادی برای شناسایی آسیب رشته‌های کابل فلزی پیش تنیده کارآمد است.

- [15] Annamdas, Venu Gopal Madhav, and Chee Kiong Soh. "Application of electromechanical impedance technique for engineering structures: review and future issues. " *Journal of Intelligent material systems and structures* 21.1 (2010): 41-59
- [16] Chaki, S. , and G. Bourse. "Guided ultrasonic waves for non-destructive monitoring of the stress levels in prestressed steel strands. " *Ultrasonics* 49.2 (2009): 162-171.
- [17] Ervin, Benjamin L. , et al. "Monitoring corrosion of rebar embedded in mortar using high-frequency guided ultrasonic waves. " *Journal of engineering mechanics* 135.1 (2009): 9-19.
- [18] Ji, Qian, et al. "Stress evaluation in seven-wire strands based on singular value feature of ultrasonic guided waves. " *Structural Health Monitoring* (2021): 14759217211005399.
- [19] Calabrese, Luigi, and Edoardo Proverbio. "A Review on the Applications of Acoustic Emission Technique in the Study of Stress Corrosion Cracking. " *Corrosion and Materials Degradation* 2.1 (2021): 1-30.
- [20] Baifeng, J. , & Weilian, Q. (2008, April). The research of acoustic emission techniques for non destructive testing and health monitoring on civil engineering structures. In 2008 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (pp. 782-785). IEEE.
- [21] Abdullah, A. B. M. *A tendon monitoring framework for unbonded post-tensioned bridges based on anchor strain response*. Diss. University of Florida, 2015.