

## EXTENDED ABSTRACT

# Experimental and Numerical Study on the Effect of Logitudinal Reinforcement Debonding at Beam-Column Connections

Sahand Sadeghi Moghadamy \*, Saeed Tarverdiloo, Mohammad Reza Sheydaii

Faculty of Civil Engineering, University of Urmia, Urmia 5756151818, Iran

**Received:** 19 April 2024; **Reviewed:** 14 August 2024; **Accepted:** 31 August 2024

### Keywords:

Bar buckling, Concrete beam, Plastic hinge, Debonding.

## 1. Introduction

In concrete beams, plastic hinges form at the beam-column connections, playing a crucial role in providing the required ductility. Due to the high stress and strain in this area, failure typically initiates as flexural and flexural-shear cracks. High-rise concrete beams are prone to single cracks in the critical region, reducing the plastic hinge length. Additionally, the longitudinal strains applied to the reinforcement in this area are high, leading to the buckling of the longitudinal reinforcement. This study aims to improve the behavior of high-rise reinforced concrete beams under cyclic loading by introducing a rubber sheath to separate the reinforcement and concrete at the plastic hinge. Full-scale specimens were tested under cyclic loading and numerically analyzed. The primary goal is to enhance the behavior of high-rise reinforced concrete beams under cyclic loading by using a rubber sheath to separate the reinforcement and concrete. The rubber sheath separation not only improved shear behavior but also reduced crack width. The number of cracks and the extent of damage at the end of the test were significantly reduced in the concrete specimen with the rubber sheath. This reduction in damage increases structural safety and reduces repair costs after events such as earthquakes. In the final part of this study, a finite element model was developed, and modeling parameters in the reinforcement-concrete interaction models were examined to achieve a numerical model with results close to the experimental tests conducted in the laboratory.

## 2. Methodology

### 2.1. Experimental study

To investigate the effect of the debonding of longitudinal reinforcements in the plastic hinge area on real-scale reinforced concrete beams, an experiment was conducted on real-scale concrete beam samples at the Crisis Management and Infrastructure Engineering Center of Urmia University. Two laboratory models in real dimensions were studied. Each sample, as part of a concrete bending frame, included two reinforced concrete beams and a square column for studying high-rise beams and minimum permissible reinforcement according to ACI regulations (Committee, 2008). The geometric specifications, longitudinal and transverse reinforcements, concrete, and laboratory conditions of both laboratory models are identical. These two laboratory models, named B1 and B2 in this study, where B1 is the base sample and B2 has debonding by a tubular rubber sheath in the longitudinal reinforcement with a length of 30 centimeters from the support edge.

## 2.2. Numerical modeling

In the simulation of laboratory models, LS-Prepost software version 4/9 was used, and for analysis, solvers from LS-Dyna version R13 were utilized. In this research, since the loading was quasi-static, the analysis was also performed using the Implicit method. While the Implicit analysis enjoys high stability, achieving convergence in all analysis steps is one of the main challenges faced in this method (Erhart, 2016). Among the various types of software elements for meshing, for concrete elements, ELFORM equal to one of the SOLID type was used, and for steel elements (reinforcements), ELFORM equal to one of the BEAM type was used.

## 3. Results and discussion

In this study, the numerical results of the samples with two different concrete behavioral models, CDPM and Winfrith, have been compared with their cyclic test results. A general comparison has also been made between the numerical results of the two concrete behavioral models for the final fracture moment, crack patterns, and similar cases. By examining the axial strain diagram in an element of the longitudinal reinforcement according to the Winfrith behavioral model, it is observed that in the numerical sample with debonded bar from concrete, the strain throughout the analysis time is approximately less than the state without debonding, and the sample without rubber sheath, before reaching the end of the analysis time, experiences buckling (sudden increase in strain in the diagram) and the element fractures. In the axial strain diagram of the same element in the CDPM behavioral model, it is observed that contrary to the previous behavioral model, the axial strain of the steel element of the sample with rubber sheath is only less than the axial strain of the steel element without rubber sheath in the first half of the loading, and after that, it shows an upward trend.

## 4. Conclusions

Observations made on laboratory samples suggest that by using the debonding of longitudinal bar from concrete by a rubber sheath, the number of cracks created in the plastic hinge area can be significantly reduced. Also, the concentration of damages occurred more at the connection point and will not transfer to the rest of the concrete beam. Regarding the buckling of longitudinal reinforcements, it can be inferred that by using a rubber sheath and debonding bar in the plastic hinge area, the type or mode of buckling of longitudinal reinforcements can be changed from overall buckling (buckling between several transverse reinforcements) to local buckling (buckling between two stirrups).

In the studies conducted on numerical models, two concrete behavioral models were considered for the samples. These two behavioral models behaved exactly the same in the linear and elastic region and in the nonlinear region, in spite of being different from each other, they estimated the laboratory resistance very accurately to a great extent. Also, the examination of numerical samples showed that by debonding, the amount of damage in the plastic hinge area can be reduced and also concentrated in a smaller range. The examination of axial strains in numerical samples showed that by debonding, a uniform strain distribution can be achieved in the longitudinal reinforcements of the plastic hinge, which will reduce the concentration of stress and strain in the longitudinal bars of the plastic hinge.

## بررسی عددی و آزمایشگاهی اثر جداسازی آرماتورهای طولی در محل اتصال تیر و ستون

سهیل صادقی مقدمی<sup>1</sup>، سعید تاروردیلو<sup>2\*</sup>، محمدرضا شیدایی<sup>2</sup>

<sup>1</sup> دانشجوی دکتری مهندسی عمران سازه، پردیس دانشگاه ارومیه

<sup>2</sup> استاد دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه ارومیه

دریافت: 1403/1/31، بازنگری: 1403/5/24، پذیرش: 1403/6/10، نشر آنلاین: 1403/6/10

### چکیده

جداسازی میلگردهای طولی روشی شناخته شده برای کاهش کرنش پلاستیک میلگرد طولی در تیرهای بتنی است. از طرفی استفاده از غلاف دور میلگرد طولی بیشتر از دیدگاه کنترل رفتار کمانشی میلگرد مورد بررسی محققین مختلف بوده است. در این تحقیق اثر جداسازی با غلاف لاستیکی روی رفتار هیستریزس تیرهای بتنی، کمانش میلگرد طولی و میزان موضعی شدن آسیب در محل مفصل پلاستیک مورد بررسی قرار می‌گیرد. میزان موضعی شدن آسیب از نظر قابلیت تعمیرپذیری و همچنین از نظر احتمال وقوع شکست برشی و برشی - لغزشی در محل مفصل پلاستیک بسیار مهم می‌باشد. دو نمونه آزمایشگاهی با و بدون غلاف تحت بارگذاری رفت و برگشتی آزمایش شدند. در ادامه با استفاده از مدل اجزای محدود LS-DYNA رفتار دو نمونه با استفاده از تحلیل عددی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشانگر عدم تأثیر محسوس غلاف در رفتار هیستریزس و کمانش میلگرد می‌باشد. همین نتایج نشان دادند که غلاف به شکل محسوس از موضعی شدن آسیب، جلوگیری می‌نماید که قابلیت تعمیرپذیری نمونه را بهبود می‌بخشد. نتایج نشانگر آن است که با استفاده از غلاف و بدون تغییر محسوس در روش ساخت فعلی تیرهای بتنی می‌توان در تیرهای بتنی به‌طرز محسوس نیاز به تعمیر را در زلزله‌های قوی کاهش داد. کاهش میزان موضعی شدن آسیب (ترک‌ها) در ضمن می‌تواند احتمال وقوع شکست برشی و برشی - لغزشی را کاهش دهد.

**کلیدواژه‌ها:** کمانش آرماتور، تیر بتنی، مفصل پلاستیک، رفتار چرخه‌ای، جداسازی آرماتور از بتن.

### 1- مقدمه

سازه را دارد. تغییر شکل یا دوران مورد نیاز در عضو به‌وسیله انحنای مقطع و طول مفصل پلاستیک در عضو، تأمین می‌شود (Bigaj و Walraven, 2002).

با در نظر گرفتن تدابیری برای افزایش طول مفصل پلاستیک در اعضای بتنی و افزایش ناحیه گسترش ترک‌های ایجاد شده در مفصل پلاستیک، می‌توان یک مفصل پلاستیک با شکل‌پذیری بالا ایجاد نمود. تشکیل مفصل پلاستیک در مقطع با ایجاد ترک‌های گسترده در محل‌های مستعد گسیختگی اعضا و تشکیل مکانیزم شکست، در نظر گرفته می‌شود و یکی از حالت‌های گسیختگی مناسب برای عملکرد لرزه‌ای المان‌های بتن مسلح، ایجاد ترک‌های زیاد در محل مفصل پلاستیک از پیش تعیین شده در مکانیزم شکست می‌باشد.

همواره در طراحی سازه‌ها، داشتن طرح قابل‌اعتمادتر و بهینه‌تر در برابر بارهای لرزه‌ای، اهمیت ویژه‌ای داشته است. در ارزیابی عملکرد لرزه‌ای، شکل‌پذیری نقش ویژه‌ای دارد؛ چراکه شکل‌پذیری بالای اعضای بتنی سبب خواهد شد تا شکست عضو بتن مسلح تحت بارهای لرزه‌ای به‌جای شکست ترد و ناگهانی به‌صورت شکست نرم و با ترک‌های هشداردهنده صورت بگیرد. همچنین شکل‌پذیری بالای عضو، باعث کاهش نیرویی عضو شده و طراحی اعضا را اقتصادی‌تر می‌نماید. در سازه‌های بتن مسلح، مفصل‌های پلاستیک در قسمت اتصال تیر به ستون، ستون به فونداسیون و دیوار برشی به فونداسیون، تشکیل می‌شود و وظیفه اصلی تأمین شکل‌پذیری مورد نیاز را در عضو و نهایتاً در کل



بار در تیرها را بهتر درک کنند. جداسازی آرماتور از بتن با استفاده از لوله‌های پلاستیکی در اطراف آرماتورهای اصلی انجام شد. نمونه‌ها به گونه‌ای طراحی شده بودند که به صورت برشی گسیخته شوند. یکی از نتایج مهم آزمایش‌ها این بود که با افزایش طول قسمت جداسازی آرماتور از بتن، ظرفیت باربری نمونه کاهش یافت. نتیجه مهم دیگر این بود که با افزایش طول قسمت جداسازی، نوع گسیختگی ترد نبود و خاموت‌های بیشتری در قسمت ترک‌های برشی مشارکت داشتند، به همین دلیل ظرفیت باربری باقی‌مانده در این نمونه‌ها پس از گسیختگی نسبت به نمونه‌های معمولی بیشتر بود.

Pandey (2005) مطالعاتی داشتند که نشان داد با کنترل تماس آرماتور طولی و بتن می‌توان ظرفیت برشی تیر را افزایش داد و ایجاد جداسازی بین آرماتور و بتن موجب تغییر مود گسیختگی از برشی به خمشی می‌شود.

یکی از جنبه‌های مورد بررسی در تحقیقات صورت گرفته بر روی جداسازی اتصال بتن از آرماتورهای طولی، استفاده از آرماتورهای بدون اتصال به بتن و نقش آن‌ها در بهبود مکانیسم‌های انتقال تنش ثانویه یا به عبارت دیگر مسیر انتقال نیرو جایگزین<sup>1</sup> یا ALP در خرابی پیش‌رونده سازه‌ها است.

Tan و Yu در سال 2012 تحقیقات خود را در این زمینه و در مورد تأثیر استفاده از جداسازی اتصال آرماتور اصلی و بتن در محل اتصال تیر و ستون را در سناریوی خرابی پیش‌رونده که یک ستون حذف می‌شود، بررسی نمودند. نمونه اول ساخته شده به روش غیرلرزه‌ای طراحی شده بود. ولی در نمونه دوم، برای جلوگیری از تمرکز کرنش‌ها در محل اتصال و همچنین افزایش ظرفیت دورانی در محل اتصال تیر به ستون، آرماتورهای طولی تیر در قسمت مفصل پلاستیک، با استفاده از غلاف‌های پلاستیکی، اتصال آن از بتن جدا شد. با بررسی دو نمونه در آزمایشگاه مشاهده شد که در نمونه دوم و با استفاده از جداسازی آرماتور از بتن، شکل‌گیری عملکرد زنجیری<sup>2</sup> به میزان 80 درصد افزایش یافته است. همچنین ظرفیت دورانی در محل اتصال تیر به ستون‌های کناری و حتی ستون وسط بهبود یافته است. محققان پیشنهاد کرده‌اند که مطالعات آزمایشگاهی بیشتری برای درک بهتر مکانیسم‌های انتقال بار در این نوع سازه‌ها انجام شود.

مطالعاتی توسط Bao و همکارانش در سال 2013 برای بررسی اثر جداسازی آرماتور از بتن روی خرابی پیش‌رونده انجام گرفت که روش جداسازی آرماتور را به عنوان روشی برای کاهش تمرکز تنش در محل ترک عضو بتنی معرفی کردند. همچنین Kotsivos و همکاران (2013) روش جداسازی آرماتور از بتن برای مقاطعی به ابعاد 200×200 میلی‌متر را طی تحقیقاتی به عنوان روشی برای

فرایند تخریب آرماتورهای طولی از کمانش محلی شروع و به بریدگی در مفصل پلاستیک تحت یک زلزله شدید خاتمه می‌یابد. اتصال بین آرماتورهای طولی و بتن منجر به تمرکز خسارت در یک محل مخصوص و با فاصله کم از یکدیگر می‌شود که در این محل از قبل کمانش آرماتور رخ داده است. یکی از راه‌های کاهش این خسارت متمرکز در آرماتورهای طولی، ایجاد جداسازی بین آرماتور و بتن در محل مفصل‌های پلاستیک می‌باشد.

Kani و همکارانش (1964) اولین محققانی بودند که اعلام کردند به صورت غیرمنتظره هرچه اتصال بین آرماتور و بتن کاهش می‌یابد ظرفیت باربری خمشی در تیرهای بتن‌آرمه افزایش می‌یابد. سپس Takiguchi و همکاران (1976) با مطالعات آزمایشگاهی تیرهایی که اتصال آرماتور توسط پارافین ضعیف شده بود دریافتند که سهم آرماتور از فشار مقطع کاهش و به سهم بتن افزوده شده است. با جداسازی اتصال بین آرماتور و بتن به صورت مناسب در طول معینی تغییر شکل آرماتورهای طولی به دلیل اجتناب از متمرکز بودن کرنش‌هایی که در آن طول تشکیل می‌شدند، کاهش می‌یابد (Kawashima و همکاران، 2001).

Ashraf و Ranasinghe (2001) مطالعات آزمایشگاهی خود را بر روی تیرهای با اتصال جداسازی بتن از آرماتور معمولی و پس کشیده انجام دادند. ایشان در تحقیقات خود به این نتیجه رسیدند که با ایجاد جداسازی و کاهش مقاومت اتصال بتن و آرماتور طولی نوع گسیختگی تیر بتنی از برشی به خمشی تغییر خواهد یافت و مقاومت برشی تیر افزایش می‌یابد.

Takahashi (2002) در تحقیقات خود، مطالعاتی بر روی پایه‌های بتنی پل‌ها انجام داد و نوع جدیدی از اتصالات ستون به فونداسیون را با استفاده از آرماتورهای غیر متصل به بتن بررسی کرد. مطالعات عددی و آزمایشگاهی ایشان بر روی این نوع از اتصالات نشان داد که نمونه‌های جدید ستون با آرماتورهای جداسازی از بتن در محل مفصل پلاستیک، عملکرد لرزه‌ای بالایی در زلزله‌های شدید دارند و امکان تعمیر و مقاوم‌سازی آن‌ها پس از زلزله‌های مخرب بیشتر از نمونه‌های معمولی است. همچنین، سختی پس از کمانش در این نوع ستون‌ها با استفاده از آرماتورهای بدون تماس با بتن، نسبت به نمونه‌های معمولی افزایش می‌یابد.

در سال 2003، Jeppsson و Thelandersson نتایج تحقیقات خود را منتشر کردند که هدف آن بررسی رفتار برشی تیرهای بتنی بود که در نواحی نزدیک به تکیه‌گاه، آرماتورهای طولی آن‌ها دچار زوال اتصال به بتن یا جداسازی شده بودند. آن‌ها با کمک نتایج نمونه‌های آزمایشگاهی، تحلیل عددی با استفاده از مدل ساده‌شده‌ای که شامل معادلات تعادل و روابط تنش-جداسازی اتصال فولاد به بتن بود، انجام دادند تا مکانیسم انتقال



شکل 1- قرار دادن غلاف پلاستیکی در آرماتورهای طولی قبل از شروع مراحل آرماتوربندی

هر نمونه به عنوان بخشی از قاب خمشی بتنی شامل دو تیر مسلح بتنی و یک ستونک مربعی برای مطالعه تیرهایی با ارتفاع زیاد و آرماتور حداقل مجاز طبق ضوابط آیین نامه ACI318 ساخته شد. مشخصات هندسی، آرماتورهای طولی و عرضی، بتن و شرایط آزمایشگاهی هر دو مدل آزمایشگاهی یکسان است. این دو مدل آزمایشگاهی که با نامهای B1 و B2 در این تحقیق نام گذاری شده اند که B1 نمونه مبنا و B2 دارای جاداشدگی توسط غلاف تیوبی لاستیکی در آرماتور طولی به طول 30 سانتی متر از بر تکیه گاه می باشد. همان طور که در شکل (1) مشاهده می شود، در این نمونه با استفاده از یک غلاف لاستیکی در محل اتصال تیر به ستون در آرماتورهای طولی، جاداشدگی بین بتن و فولاد ایجاد شده است.

در شکل (2) و شکل (3) مشخصات هندسی و نحوه آرماتوربندی تیر نمونه یک و دو نشان داده شده است. تیر نمونه شماره 2 تنها در جاداشدگی آرماتورهای ناحیه مفصل پلاستیک با تیر نمونه شماره 1 تفاوت خواهد داشت. با توجه به این شکل ها، ارتفاع تیر در هر دو نمونه برابر با 500 میلی متر، عرض تیرها برابر با 300 میلی متر و طول تیرهای چپ و راست در هر دو نمونه یکسان و برابر با 2/1 متر می باشد. در وسط هر دو نمونه و در محل اتصال، یک ستونک بتنی با عرض 500 میلی متر و ارتفاع 1000 میلی متر در نظر گرفته شده است که بارگذاری بر روی این ستونک بتنی با استفاده از ستون بارگذاری اعمال خواهد شد. در مدل اول یا B1 الگوی آرماتورگذاری حالت استاندارد و متداول آیین نامه را دارد که در شکل (1) نشان داده شده است. در نمونه دوم یا نمونه B2 آرماتورهای طولی و عرضی مشابه نمونه قبل می باشد ولی در

کاهش تراکم آرماتورهای عرضی بدون نقض ضوابط آیین نامه های معتبر معرفی نمودند. Wang و همکارانش (2019) مطالعاتی در مورد جاداشدگی و تقویت آرماتور طولی به وسیله الیاف FRP مطالعاتی داشتند که نشان داد شکل پذیری افزایش ولی ظرفیت باربری جانبی مقداری کاهش یافت.

با در نظر گرفتن بحرانی بودن برش و تغییر شکل های اعمال شده در ناحیه مفصل پلاستیک همراه با افزایش عمق تیرها طبق ضوابط آیین نامه های مختلف بایستی تعداد یا مساحت آرماتورها افزایش و یا فاصله آنها کاهش یابد. با توجه به این که شدت تغییر در تعداد یا مساحت یا فاصله آرماتورها شدید می باشد، باعث مشکلات جدی در مراحل اجرایی آرماتوربندی و قالب بندی خواهد شد. می توان به عنوان راه حلی برای چالش فوق از سیستم جاداشدگی آرماتور از بتن در طول معینی بهره برد. تحقیقات گذشته که در مقدمه بررسی شده است، در مورد اثرات جاداشدگی بر روی مود کماتش میلگردهای طولی، تاکنون نتیجه ای را ارائه نداده است. همچنین همه آزمایش های انجام شده بر روی تیرهای بتنی، بر روی نمونه های مقیاس شده با ابعاد پایین بوده در صورتی که مسئله کماتش در میلگردهای طولی، در تیرهای با عمق بالا بحرانی می باشد که در این تحقیق به بررسی اثر جاداشدگی آرماتورهای طولی در ناحیه مفصل پلاستیک بر روی رفتار کماتشی و مود گسیختگی نمونه تیر بتنی، پرداخته شده است. در این تحقیق با انجام تست های آزمایشگاهی بر روی نمونه هایی در ابعاد واقعی و تحلیل عددی آنها با ایجاد جاداشدگی آرماتور و بتن در محل مفصل پلاستیک به صورت غلاف لاستیکی، سعی شده است تا رفتار تیرهای بتن مسلح با ارتفاع بالا بهبود یابد. به عبارتی جاداشدگی بین آرماتور طولی و بتن توسط غلاف لاستیکی بررسی شده است. با مقایسه نتایج عملی آزمایش و تحلیل عددی انواع حالت های آرماتور در تیر بتنی مسلح بهترین حالت و تفاوت ها مقایسه شده است.

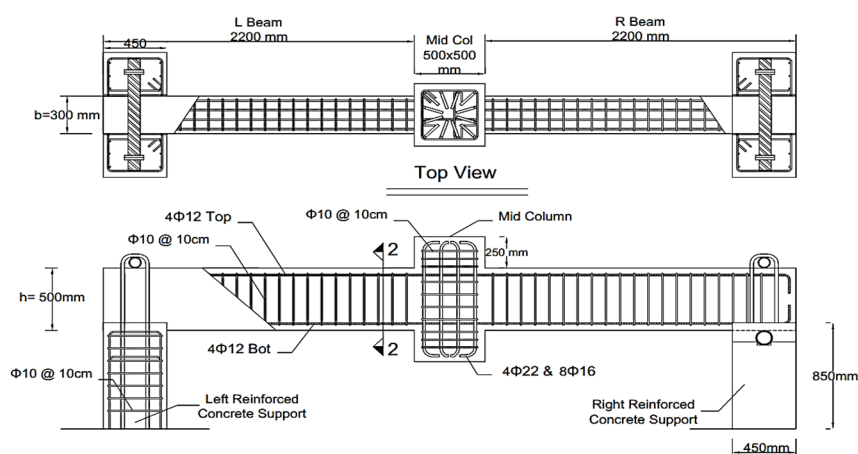
## 2- معرفی مشخصات نمونه های تحت آزمایش

برای بررسی اثر جاداشدگی آرماتورهای طولی در ناحیه مفصل پلاستیک در تیرهای بتن آرمه در مقیاس واقعی، در مرکز مدیریت بحران و مهندسی زيرساخت دانشگاه ارومیه، توسط جک هیدرولیکی انجام شده است. این جک هیدرولیکی به همراه قاب فولادی آن بر روی کف مقاومی با ابعاد 14x6 متر و عمق 1/2 متر نصب شده است که توانایی تحمل فشار تا 100 تن را دارد. ظرفیت اسمی این جک هیدرولیکی در بارگذاری های استاتیکی 100 تن و در بارگذاری های دینامیکی 65 تن است. آزمایش بر روی نمونه های تیرستون بتنی در مقیاس واقعی انجام شد، دو مدل آزمایشگاهی در ابعاد واقعی مورد مطالعه قرار گرفت.

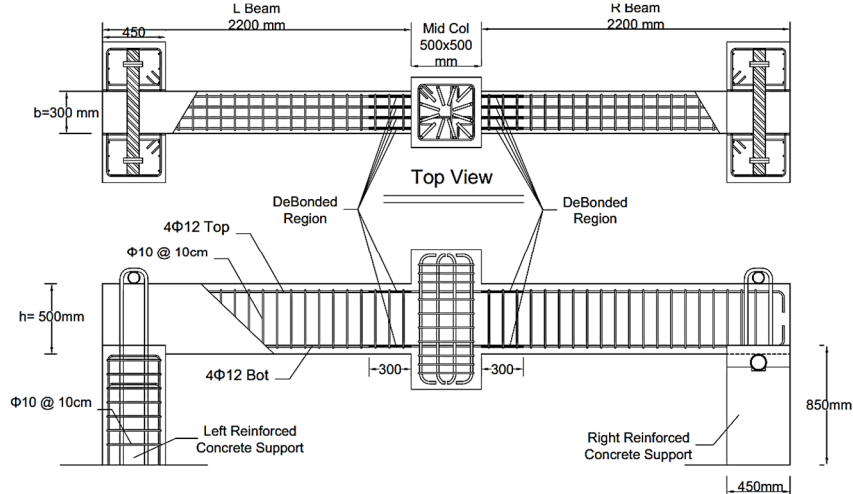
است، بعد از عمل‌آوری 28 روزه در حوضچه آب، نیروی شکست نمونه‌های استوانه‌ای به‌ترتیب 454/32، 465/1 و 478/18 با واحد کیلونیوتن و مقاومت شکست نمونه‌ها به‌ترتیب 26/32، 25/71 و 27/06 با واحد مگاپاسکال می‌باشد. قسمت بعدی این پژوهش، مروری بر روش آزمایش بر نمونه‌های تیرستون بتنی خواهد داشت. نتایج آزمایش فشار مستقیم سه نمونه استوانه‌ای بتنی با قطر 15 و ارتفاع 30 سانتی‌متری که از محل بتن‌ریزی جمع‌آوری شده است، بعد از عمل‌آوری 28 روزه در حوضچه آب، نیروی شکست نمونه‌های استوانه‌ای به‌ترتیب 454/32، 465/1 و 478/18 با واحد کیلونیوتن و مقاومت شکست نمونه‌ها به‌ترتیب 26/32، 25/71 و 27/06 با واحد مگاپاسکال می‌باشد. قسمت بعدی این پژوهش، مروری بر روش آزمایش بر نمونه‌های تیرستون بتنی خواهد داشت.

این نمونه، آرماتورهای طولی در محل مفصل پلاستیک، همراه با المان تیوب لاستیکی جداساز می‌باشد. قطر آرماتورهای طولی 12 میلی‌متر و قطر آرماتورهای عرضی 10 میلی‌متر برای کلیه نمونه‌ها در نظر گرفته شده است.

با انجام آزمایش بر روی دو قطعه از آرماتورهای طولی با قطر 12 میلی‌متر طبق ضوابط 3132 سازمان ملی استاندارد، مقاومت تسلیم 487 و 488 مگاپاسکال ثبت شده است. بتن مصرفی با رده مقاومتی C25 انتخاب شده است. بتن‌ریزی نمونه‌ها به‌روش بتن آماده و طبق اظهار شرکت ارائه دهنده بتن آماده جزئیات طرح اختلاط بتن آماده، وزن در یک متر مکعب بتن برای سیمان، سنگ‌دانه ریز، سنگ‌دانه درشت و آب به‌ترتیب 600، 1300، 380 و 120 با واحد کیلوگرم نیرو می‌باشد. بتن مورد استفاده در آزمایش طبق ضوابط 6044 سازمان استاندارد ملی تهیه شده است. نتایج آزمایش فشار مستقیم سه نمونه استوانه‌ای بتنی با قطر 15 و ارتفاع 30 سانتی‌متری که از محل بتن‌ریزی جمع‌آوری شده



شکل 2- جزئیات هندسی نمونه شماره 1 یا B1



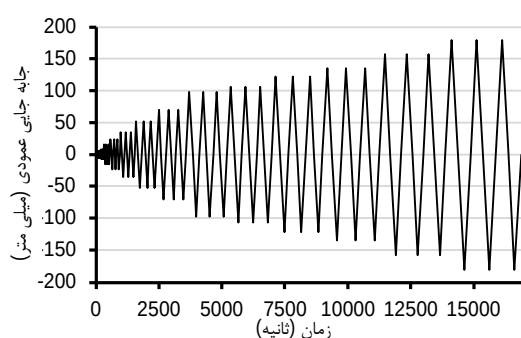
شکل 3- جزئیات هندسی نمونه شماره 2 یا B2



بارگذاری قرارگرفته بر روی نمونه‌های تیرستون بتنی مطابق شکل (5) می‌باشد. بارگذاری طی 12 گام که هر گام شامل سه سیکل با تغییر شکل یکسان است، به نمونه‌ها اعمال شده است. پروتکل بارگذاری طبق یکی از گزارشات PEER که مرتبط با این آزمایش می‌باشد، انتخاب شده است (Panagiotou, 2013). سرعت بارگذاری وارد شده بر روی نمونه‌ها برابر با 20 میلی‌متر در دقیقه اعمال می‌شود. لازم به ذکر است ظرفیت بارگذاری استاتیکی و دینامیکی این جک هیدرولیکی به ترتیب 100 و 65 تن می‌باشد.

#### 4- نتایج آزمایش بر روی نمونه‌ها

این بخش، مروری بر نتایج آزمایشگاهی به دست آمده از تست چرخه‌ای نمونه بتنی با آرماتور گذاری متداول و آرماتور جدا شده در قسمت مفصل پلاستیک دارد. در شکل (6)، رفتار نمونه پایه یا مبنا (نمونه B1) مشاهده می‌شود. مقدار جابه‌جایی نهایی در این نمونه برابر با 97/33 میلی‌متر و مقاومت بیشینه (در جهت بالا یا پایین) برابر با 136 کیلو نیوتن می‌باشد. این نمونه با تحمل 10 گام بارگذاری و پس از شکست 5 میلگرد، کاملاً ظرفیت باربری خود را از دست داده و آزمایش متوقف می‌شود. تعداد ترک‌های ایجاد شده در نمونه مبنا برابر با 69 ترک بوده که در شکل (8) قابل مشاهده می‌باشد. همان‌طور که در شکل (8) مشاهده می‌شود، ترک‌های ایجاد شده بر روی این نمونه به صورت ترک‌های خمشی - برشی بوده و این نشان‌دهنده نقش این نیروها در ایجاد ترک‌های محل اتصال می‌باشد.



شکل 5- بارگذاری چرخه‌ای اعمال شده به نمونه‌های آزمایشگاهی شماره 1 و 2

پس از تست نمونه شماره 2، منحنی رفتاری آن طبق شکل (7) به دست آمده است. بیشترین مقدار جابه‌جایی به دست آمده در این نمونه 70/18 میلی‌متر و بیشینه مقاومت نمونه در بارگذاری چرخه‌ای به بالا و پایین برابر با 117 کیلو نیوتن می‌باشد که نسبت به نمونه مبنا کاهش نشان داده است. ولی در مورد تعداد ترک‌های ایجاد شده در این نمونه، تعداد 30 ترک کلی و جزئی در این نمونه ایجاد شده که نسبت به نمونه پایه تقریباً به نصف کاهش نشان

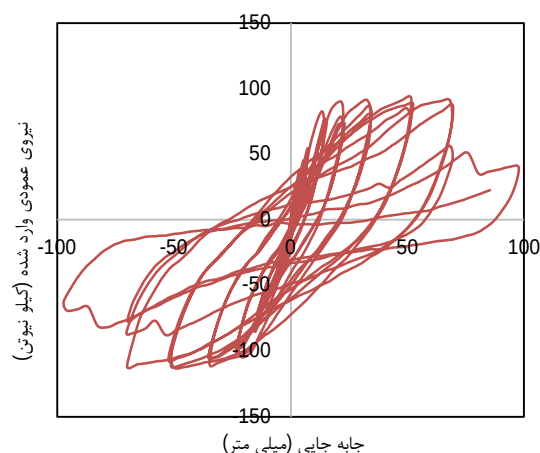


شکل 4- نمونه تیرستون بتنی قرار داده شده بر زیر جک هیدرولیکی قبل از شروع آزمایش

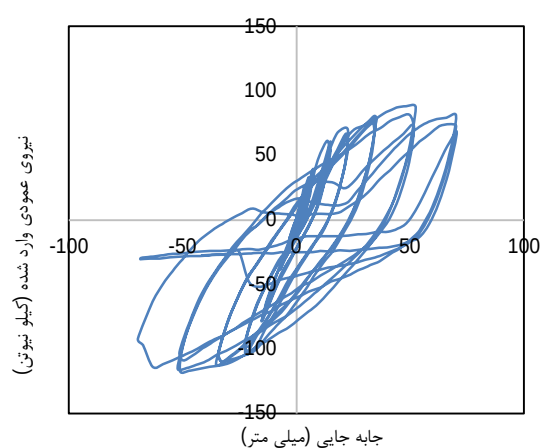
#### 3- روش آزمایش

در این آزمایش‌ها نمونه‌ها روی دوپایه بتنی مسلح جهت آزمایش و اعمال بارگذاری چرخه‌ای توسط جک هیدرولیکی قرار گرفته‌اند. به کمک ورق‌های فولادی تقویت شده توسط سخت‌کننده در دو جهت بالا و پایین ستونک میانی، بارگذاری جک هیدرولیکی به نمونه انتقال می‌یابد. این ورق‌های فولادی ضخامت 15 میلی‌متر و ابعاد 500 در 700 میلی‌متر داشته و توسط 8 آرماتور قطر 20 به هم متصل شده‌اند. ورق بالا و پایین ستون به ترتیب نقش انتقال و اعمال نیروهای فشاری کششی را ایفا می‌کنند. مطابق شکل (4) به کمک یک پروفیل استوانه‌ای به ضخامت 8 میلی‌متر و قطر 200 میلی‌متر که به ورق بالای ستون وصل شده است بارگذاری جک هیدرولیکی به ورق‌های فولادی و در نهایت به نمونه آزمایشگاه انتقال می‌یابد. نمونه‌های آزمایشگاهی بر روی دوپایه ستونی قرار داده شده‌اند که در محل قرارگیری این نمونه‌ها بر روی تکیه‌گاه‌های بتنی، دو پروفیل فولادی استوانه‌ای در بالا و پایین قرار گرفته است تا شرایط تکیه‌گاهی مفصلی ساده ایجاد شده و از اعمال لنگر تکیه‌گاهی جلوگیری شود.

شرایط تکیه‌گاهی برای نمونه‌ها به صورت غلتکی فرض شده بود که به این منظور از پروفیل لوله‌ای از جنس فولاد با قطر 110 میلی‌متر استفاده شد که توسط دو میلگرد با قطر 16 میلی‌متر مهار شدند. کابل‌های فلزی با قطر 18 میلی‌متر برای مهار مجموعه پایه و غلتک در مقابله با بارهایی در جهت بالا برای اتصال به کف صلب استفاده شد. مجموعه قاب فلزی و جک هیدرولیکی روی کفی مقاوم به ظرفیت 100 تن فشار به ابعاد 6 در 4 متر به عمق 1/2 متر مستقر شده است.



شکل 6- رفتار نمونه پایه (نمونه B1) تحت بارگذاری چرخه‌ای وارد شده



شکل 7- رفتار نمونه دوم (نمونه B2) تحت بارگذاری چرخه‌ای وارد شده

داده است. بیشترین خسارت ایجاد شده در این نمونه در ناحیه اتصال تیر به ستون به دلیل کماتر آرماتورهای طولی در بین دو خاموت اتفاق افتاده است که همین کماتر، سبب شده است تا مقاومت کمتری را نسبت به نمونه مبنا از خود نشان دهد. حالت نهایی و گسیخته شده این نمونه را می‌توان در شکل (9) مشاهده نمود. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، تعداد ترک‌های نمونه شماره 2 به صورت قابل توجهی کمتر از نمونه شماره 1 است. همان‌طور که در شکل (9) نشان داده شده است، وضعیت ترک‌های نهایی ایجاد شده بر روی نمونه دوم، ترک‌های خمشی را نشان می‌دهد و بیشتر ترک‌های ایجاد شده به صورت قائم (خمشی) می‌باشد و نسبت به حالت پایه (نمونه اول) مقدار ترک‌های خمشی - برشی از خود کاهش نشان داده است که این خود نشان‌دهنده کاهش نیروهای برشی در محل اتصال تکیه‌گاه می‌باشد. پس می‌توان گفت با استفاده از جداسازی در اتصال آرماتور و بتن می‌توان نوع ترک‌ها را از ترک‌های خمشی - برشی به ترک‌های خمشی تغییر داد. همچنین با بررسی این شکل‌ها مشاهده می‌شود که در نمونه غلاف‌دار، مقدار عرض ترک‌ها نسبت به نمونه اول یا پایه، بسیار کمتر بوده و مقدار آسیب نیز کاهش یافته است. بنابراین می‌توان با اضافه نمودن غلاف پلاستیکی در ناحیه مفصل پلاستیکی، توانایی تعمیر پس از زلزله یا رخدادهای شبیه به آن را افزایش داد. به عبارت دیگر تاب‌آوری تعمیر را در تیرهای بتنی با اضافه نمودن غلاف پلاستیکی، می‌توان افزایش داد. می‌توان این سیستم را با هزینه بسیار کم به عنوان یک سیستم کمکی برای کاهش خرابی‌ها در تیرهای بتن آرمه به آیین‌نامه‌های ساختمانی پیشنهاد نمود. در ادامه به بررسی دقیق‌تر ناحیه مفصل پلاستیک در این نمونه‌ها پرداخته می‌شود.



شکل 8- حالت نهایی نمونه مبنا یا B1 در حالت نهایی (اتمام آزمایش)





شکل 9- حالت نهایی نمونه دوم یا B2 در حالت نهایی (اتمام آزمایش)



شکل 10- وضعیت میلگردهای طولی در پایان آزمایش در نمونه پایه یا نمونه شماره 1 (B1)



شکل 11- وضعیت میلگردهای طولی در پایان آزمایش در نمونه شماره 2 (B2)

در شکل (10) و شکل (11)، وضعیت نهایی میلگردهای طولی در ناحیه مفصل پلاستیک به ترتیب در نمونه پایه (نمونه B1) و نمونه دوم که در ناحیه مفصل پلاستیک از جداساز استفاده شده است، مشاهده می شود. با توجه به مطالعات گذشته در صورتی که فاصله بین خاموت ها مناسب نباشد، کمانش محلی (کمانش بین دو خاموت یا آرماتور عرضی)<sup>1</sup> رخ می دهد (Massone و Lopez, 2014).

حال در صورتی که طول کمانش میلگردهای طولی بیشتر از فاصله بین دو خاموت (آرماتور عرضی) باشد، نوع کمانش از نوع کلی<sup>2</sup> رخ خواهد داد. همان طور که در این دو نمونه مشاهده می شود (در شکل های شکل (10) و شکل (11))، نوع کمانش در میلگردهای نمونه پایه به صورت کلی می باشد در صورتی که برای میلگردهای طولی نمونه دوم، این کمانش به صورت محلی بوده و نشان دهنده تغییر مود کمانشی با استفاده از جداسازی اتصال میان بتن و میلگردهای طولی می باشد. در نمونه دوم دارای جداساز، طول ناحیه ای از بتن پوسته که گسیخته شده بسیار کمتر شده و این نشان دهنده این است که با استفاده از جداسازی اتصال بتن و آرماتورهای طولی می توان نوع کمانش آرماتورهای طولی را تغییر داد. همچنین با توجه به نتایج آزمایش، می توان دریافت در صورتی که فاصله بین خاموت های عرضی کاهش یابد، می توان از کمانش محلی در نمونه دوم نیز جلوگیری نمود. در بخش بعدی، سعی شده است تا مدل عددی مبتنی بر این نمونه های آزمایشگاهی به صورت اجزای محدود آماده سازی شود.

2. Global buckling mode

1. Local buckling mode

## 5- مدل سازی عددی

مدل رفتاری درواقع اصلاح شده مدل قبلی بود که در سال 2006 توسط ایشان ارائه شده بود (Grassl و Jirasek, 2006).

مدل رفتاری CDPM2 که مخصوص المان های جامد یا Solid طراحی شده، به کاربر اجازه می دهد تا چندین پارامتر را تنظیم کند. بسیاری از این پارامترها دارای مقادیر پیش فرضی هستند که بر پایه داده های تجربی تعیین شده اند. این مدل برای توصیف رفتار شکست سازه های بتنی تحت بارگذاری های دینامیکی چندمحوری طراحی گردیده و به صورت یک مدل آسیب-پلاستیسیته<sup>3</sup> فرموله شده است. در این مدل، بخش پلاستیسیته بر مبنای تنش مؤثر و مستقل از آسیب تعریف شده است. در مقابل، بخش آسیب بر اساس معیارهای کرنش پلاستیک و الاستیک فرموله شده است. این مدل رفتاری قابلیت استفاده در شرایط ایزوتروپیک<sup>4</sup> و غیرایزوتروپیک (ناهمسانگرد)<sup>5</sup> را داراست.

Grassl و همکاران ادعا کرده اند که مدل موردنظرشان قادر است تا رفتار بتن را تحت تنش های چندمحوره تجزیه و تحلیل کند و نتایج دقیقی را برای منحنی بار-جابجایی فراهم آورد، بدون این Grassl که به مش بندی وابسته باشد. با این حال، این مدل در ابتدا تنها با استفاده از یک پارامتر برای شبیه سازی کشش و فشار طراحی شده بود، که این امر در زمان مدل سازی انتقال از شکست کششی به فشاری مشکلاتی را ایجاد می کرد. بر همین اساس، در سال 2013، Grassl و همکاران مدل را بهبود بخشیدند و مدل رفتاری CDPM2 را ارائه دادند که توانایی شبیه سازی رفتار بتن را به صورت مستقل از مش بندی داشت و علاوه بر آن، قادر بود تغییرات بین شکست کششی و فشاری را به طور مؤثری نمایش دهد.

در این مطالعه، یکی از مدل های برجسته ای که برای تحلیل دقیق تر مدل سازی عددی مورد استفاده قرار گرفته، مدل رفتاری بتن Winfrith است که در نرم افزار تحت شماره 84 معرفی شده است. این مدل، که بر پایه مفهوم Smeared-Crack توسعه یافته، یک سیستم الاستوپلاستیک کامل را در منطقه تحت فشار بتن پیش بینی می کند (Broadhouse و Neilson, 1987). در این مدل، ترک ها زمانی شکل می گیرند که تنش های کششی از حداکثر مقدار مجاز خود فراتر روند و به صورت عمود برجهت حداکثر تنش اصلی ایجاد می شوند. پس از ایجاد اولین ترک، تنش های برشی می توانند از طریق برهم کنش سنگ دانه ها در امتداد ترک منتشر شوند (Asgarpoor و همکاران، 2021).

مدل رفتاری شماره 84 یا Winfrith امکان مدل سازی رفتار بتن پس از ترک خوردگی را در دو حالت فراهم می آورد (Zhao و همکاران، 2021). یک رفتار خطی ساده بدون در نظر گرفتن نرخ

در این پژوهش، ابتدا به بررسی مدل های آزمایشگاهی نمونه های بتن مسلح با ابعاد واقعی پرداخته شد. سپس، تحلیل این نمونه ها با استفاده از روش مدل سازی اجزاء محدود انجام شد. در حوزه مدل سازی سازه های بتن آرمه، نرم افزارهای متعددی وجود دارند. بر اساس بررسی های صورت گرفته، نرم افزار LS-Dyna به عنوان یکی از برترین نرم افزارهای تجاری شناخته شده است که قابلیت تحلیل سازه های بتن آرمه تحت بارگذاری چرخه ای را داراست و مدل های رفتاری متنوعی برای بتن ارائه می دهد. این نرم افزار دارای مزایای بسیاری است، از جمله تنوع بالای المان ها و مدل های رفتاری مصالح، و همچنین قابلیت حل مسائل استاتیکی و دینامیکی به روش های صریح<sup>1</sup> و ضمنی<sup>2</sup> نرم افزار LS-Dyna که در ابتدا در سال 1976 تحت عنوان DYNA3D منتشر شد، در آن زمان تنها امکانات محدودی را فراهم می کرد (Hallquist, 2018). در شبیه سازی مدل های آزمایشگاهی، از نرم افزار LS-Prepost نسخه 4/9 و برای تحلیل، از حل گرهای LS-Dyna نسخه R13 استفاده شده است. در این مدل عددی، واحد طول به میلی متر، واحد نیرو به نیوتن و واحد زمان به میلی ثانیه تعریف شده است. یکی از مهم ترین قسمت های مدل سازی عددی، تعیین پارامترهای مدل های رفتاری مصالح یا مواد به کاررفته در نمونه می باشد. در این تحقیق فولاد و بتن استفاده شده است که در ادامه در مورد مدل های رفتاری مختلف هر یک و پارامترهای در نظر گرفته شده برای آن، بحث و بررسی خواهد شد.

## 5-1- پارامترهای مدل رفتاری بتن

نرم افزار LS-Dyna یکی از جامع ترین بانک های مدل رفتاری را در بین نرم افزارهای مدل سازی به روش اجزای محدود را دارد. برای مدل سازی رفتار مدل ماده بتن و بتن مسلح نیز تا اکنون بیش از 14 مدل رفتاری توسط محققان مختلفی به این نرم افزار اضافه شده است که می توانید در جدول (1) مشاهده کنید (Winkelbauer, 2015). در این پژوهش به تمامی مدل های رفتاری بتن پرداخته نمی شود ولی دو مدل رفتاری محبوب مورد بحث و بررسی بیشتر قرار می گیرد. یکی از این مدل های رفتاری مدل رفتاری CDPM2 و مدل رفتاری بعدی، مدل بتن Winfrith می باشد. لازم به ذکر است که توضیحات کامل این دو مدل رفتاری بتن در راهنمای نرم افزار آورده شده است.

مدل رفتاری CDPM2 با شماره 273 توسط Grassl و همکارانش معرفی شده است (Grassl و همکاران، 2013) که این

4. Isotropic  
5. Anisotropic

1. Explicit  
2. Implicit  
3. Damage-Plasticity

گرفته شده است. محققان زیادی هم به این نتیجه رسیدند که این مدل رفتاری با نرخ کرنش ثابت پاسخهای بهتری را ارائه می کند (Schwer, 2011).

بخش پلاستیسیته مدل بتن Winfrith بر اساس سطح شکست برشی پیشنهادی توسط Etosen در سال 1977 استوار است. همچنین بخش ایجاد ترک در این مدل رفتاری بر اساس آزمایشات انجام شده توسط Wittmann و همکاران (1988) شکل گرفته است. Wittmann و همکارانش در تستهای آزمایشگاهی بر روی تعداد بسیار زیاد نمونه های بتنی با حداکثر سائز سنگدانه، مقاومت فشاری، نرخ بارگذاری و نسبت آب به سیمان متفاوت، انرژی شکست، مقدار جابه جایی شکست ترک و بیشینه نیرو را اندازه گیری نمودند.

کرنش و یک رفتار دوخطی که نرخ کرنش را در نظر می گیرد. با توجه به این که بارگذاری و تحلیل ها در این پژوهش در قسمت آزمایشگاهی به صورت شبه استاتیکی (با نرخ بارگذاری 20 میلی متر در دقیقه) انجام شده اند، از اثرات نرخ کرنش و بارگذاری دینامیکی صرف نظر شده و رفتار پس از ترک خوردگی با استفاده از یک منحنی تک خطی ساده مدل سازی شده است.

در نرم افزار LS-Dyna پارامتر RATE برای در نظر گرفتن نرخ کرنش در نظر گرفته شده است. مقدار این پارامتر در صورتی که برابر با 1 باشد، اثرات تغییر نرخ کرنش در نظر گرفته نخواهد شد و در صورتی که برابر با صفر باشد، این نرخ کرنش در نظر گرفته خواهد شد. همان طور که گفته شد به دلیل این که شدت بارگذاری با سرعت ثابتی بوده است، مقدار این پارامتر برابر با یک در نظر

**جدول 1- مدل های رفتاری مختلف مورد استفاده برای بتن در نرم افزار LS-dyna**

| ردیف | نام کامل مدل                         | شماره مدل در نرم افزار | استقلال از نرخ بارگذاری | قابلیت مدل سازی خرابی |
|------|--------------------------------------|------------------------|-------------------------|-----------------------|
| 1    | Soil and Foam model                  | *Mat_005               | خیر                     | خیر                   |
| 2    | Psuedo-Tensor                        | *Mat_016               | خیر                     | خیر                   |
| 3    | Oriented Crack                       | *Mat_017               | خیر                     | خیر                   |
| 4    | Geological Cap                       | *Mat_025               | خیر                     | خیر                   |
| 5    | Concrete Damage                      | *Mat_072               | بله                     | خیر                   |
| 6    | Concrete Damage Rel3 (K&C)           | *Mat_072R3             | بله                     | بله                   |
| 7    | Brittle Damage                       | *Mat_096               | خیر                     | خیر                   |
| 8    | Soil Concrete                        | *Mat_078               | خیر                     | خیر                   |
| 9    | Winfrith Concrete                    | *Mat_084               | بله                     | خیر                   |
| 10   | Johnson Holmquist Concrete           | *Mat_111               | بله                     | خیر                   |
| 11   | Schwer Murray Cap                    | *Mat_145               | خیر                     | بله                   |
| 12   | CSCM Concrete                        | *Mat_159               | بله                     | بله                   |
| 13   | RHT                                  | *Mat_272               | بله                     | بله                   |
| 14   | Concrete Damage plastic Model (CDPM) | *Mat_273               | بله                     | بله                   |

**جدول 2- پارامترهای مورد استفاده در معرفی مدل ماده شماره 273 بتن یا CDPM2**

| ردیف | نوع پارامتر                                     | علامت | مقدار       | واحد               |
|------|-------------------------------------------------|-------|-------------|--------------------|
| 1    | چگالی وزنی بتن                                  | RO    | 0/0024      | gr/mm <sup>3</sup> |
| 2    | مدول یانگ                                       | E     | 20425/3     | MPa                |
| 3    | ضریب پواسون                                     | PR    | 0/18        | -                  |
| 4    | مقاومت فشاری تک محوره بتن                       | FC    | 25          | MPa                |
| 5    | مقاومت کششی تک محوره بتن                        | FT    | 2/4         | MPa                |
| 6    | پارامتر خروج از مرکزیت                          | ECC   | 0/52348     | -                  |
| 7    | پارامتر سخت شونده گی                            | HP    | 0/01        | -                  |
| 8    | مقدار آستانه کششی برای فرمولاسیون آسیب خطی      | WF    | 0/2378370   | mm                 |
| 9    | مقدار آستانه کششی برای بخش دوم فرمول آسیب دوخطی | WF1   | 0/0356756   | mm                 |
| 10   | انرژی شکستگی بتن                                | Gf    | 0/136979435 | N/mm               |
| 11   | نوع گسیختگی                                     | Type  | 1           | -                  |

## جدول 3- پارامترهای مورد استفاده در معرفی مدل ماده شماره

## 84 بتن یا Winfrith

| پارامتر                   | علامت در نرم افزار | مقدار   | واحد               |
|---------------------------|--------------------|---------|--------------------|
| چگالی وزنی بتن            | RO                 | 0/0024  | gr/mm <sup>3</sup> |
| مدول مماسی                | TM                 | 20425/3 | MPa                |
| ضریب پواسون               | PR                 | 0/18    | -                  |
| مقاومت فشاری تک محوره بتن | UCS                | 25      | MPa                |
| مقاومت کششی تک محوره بتن  | UTS                | 25      | MPa                |
| پارامتر FE                | FE                 | 0/1     | mm                 |
| اندازه حداکثر سنگدانه     | ASIZE              | 19      | mm                 |
| اثر نرخ کرنش              | Rate               | 1       | -                  |
| پارامتر تبدیل واحد        | CONM               | -3      | -                  |

گسیختگی یا  $\varepsilon_{cu}$  کنترل می شود. در قسمت کششی نیز، یک رفتار نرم شونده کرنشی<sup>1</sup> مشاهده می شود که با استفاده از پارامتر FE در این مدل رفتاری، تعیین می شود. در مواردی که نرخ کرنش در این مدل رفتاری در نظر گرفته شود، پارامتر FE به معنی انرژی شکست می باشد.

## 5-2- مدل سازی آرماتورها و اندرکنش بتن و آرماتور و

## جداشدگی بین آرماتور و بتن

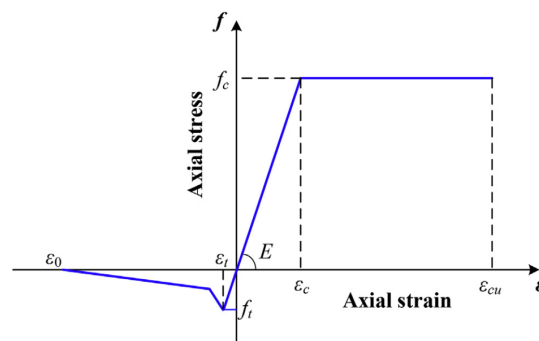
یکی از چالش های مدل عددی ارائه شده در این پژوهش، مدل سازی آرماتورها و اندرکنش بین آرماتور و بتن و همچنین بین آرماتورهای طولی و عرضی است. در این مدل سازی همچنین باید جداسازی چسبندگی بین آرماتورهای طولی، در ناحیه مفصل پلاستیک نیز در مدل عددی اعمال شود. در ادامه هر یک از این موارد بحث شده است.

برای در نظر گرفتن اندرکنش بین فولاد و بتن در نرم افزار LS-Dyna روش های مختلف وجود دارد که می توان به دو دسته کلی تقسیم بندی نمود. که دسته اول، روش های مدل سازی صریح<sup>2</sup> و دسته دوم روش های توزیع شده<sup>3</sup> (Schwer, 2014).

روش های صریح، خود به چند دسته تقسیم بندی می شود که محققان مختلف، مزایا و معایب هریک را مورد بحث قرار داده اند. بر اساس راهنمای نرم افزار LS-Dyna (Hallquist, 2018)، روش های مقید کردن یا مدفون کردن، یکی از بهترین روش ها برای در نظر گرفتن اندرکنش بین بتن و آرماتور می باشد.

روش های مقید سازی خود به سه دسته تقسیم بندی می شوند. روش \*Constraint\_Logrange\_In\_Solid که به اختصار به آن CLIS گفته می شود و روش \*Ale\_Coupling\_Nodal\_Constraint که به این قید به اختصار ACNC نیز گفته می شود، دو روش برای در نظرگیری سیال و جامدها است که برای مدفون کردن آرماتورها نیز استفاده می شود، ولی جدیدترین روش، روش \*CONSTRAINT\_BEAM\_IN\_SOLID یا CBIS است (Hallquist, 2018) که در این پژوهش نیز برای مدفون سازی آرماتورهای طولی و عرضی و همچنین آرماتورهای موجود در ستون بتنی از این قید استفاده خواهد شد. یکی دیگر از قسمت هایی که در مدل سازی آرماتورها باید مدنظر قرار بگیرد، اندرکنش آرماتورهای طولی و عرضی می باشد. برای در نظر گرفتن این اندرکنش دو راه اصلی می توان در پیش رو داشت. راه اول این است که در نقاطی که آرماتورهای طولی و عرضی به یکدیگر می رسند، این نقاط را به هم متصل کرده طوری که آرماتورهای طولی و عرضی به همدیگر پیوسته می گردند.

در تعریف پارامترهای دو مدل بتنی که در این تحقیق به کار رفته اند، مطابق با دستورالعمل های موجود در راهنمای نرم افزار (Hallquist, 2018)، برای مدل رفتاری شماره 273، می توان از معادلات مشخص شده توسط فدراسیون بین المللی بتن سازه ای، معروف به fib یا CEB-FIP، بهره برد (Du Beton FIP, 2013). پارامترهای مورد استفاده برای توصیف مدل رفتاری بتن CDPM2 در جدول (2) و پارامترهای مربوط به مدل رفتاری Winfrith در جدول (3) آورده شده اند. همچنین در راهنمای نرم افزار و مراجع ذکر شده، توضیحات بسیار بیشتری در مورد پارامترها و نحوه به دست آوردن هریک آورده شده است.



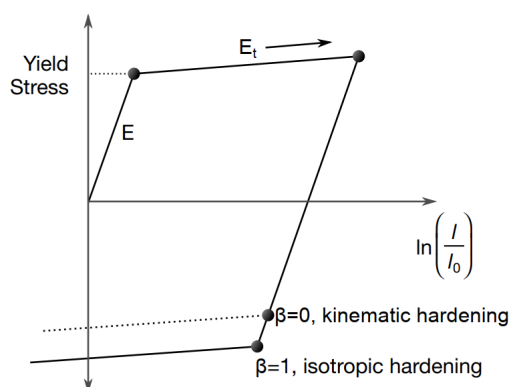
شکل 12- نمودار تنش - کرنش تک محوری مدل رفتاری

شماره 84 یا Winfrith (Qu و همکاران، 2020)

در شکل (12)، نمودار تنش - کرنش مدل رفتاری Winfrith در نمونه های مکعبی تحت بارگذاری تک محوری در دو قسمت فشاری و کششی، آورده شده است (Qu و همکاران، 2020). همان طور که در این مدل رفتاری مشاهده می شود، در قسمت فشاری یک رفتار الاستوپلاستیک کامل برقرار است که با کرنش حد نهایی

این پارامتر برابر با 2، فقط در راستای کشش و فشاری فولاد مقید می‌شود.

نکته نهایی که باید در مورد مدل‌سازی آرماتورها در نرم‌افزار LS-Dyna مورد بحث قرار گیرد، مدل رفتاری مورد استفاده برای این نوع از المان‌ها است. در این تحقیق، برای کلیه آرماتورهای موجود، از مدل رفتاری شماره 3 در نرم‌افزار یعنی MAT\_PLASTIC\_KINEMATIC استفاده شده است که توانایی مدل‌سازی سخت‌شوندگی ایزوتروپیک<sup>2</sup> و کینماتیک<sup>3</sup> را دارد و طبق راهنمای نرم‌افزار، قابلیت استفاده برای المان‌های تیر، خرپا، المان‌های حجمی سه‌بعدی و همچنین پوسته‌ها و ورق را دارد. در شکل (14)، نمودار مدل رفتاری این ماده نشان داده شده است. همچنین پارامترهای انتخاب شده برای این مدل رفتاری نیز در جدول (4) نشان داده شده است.



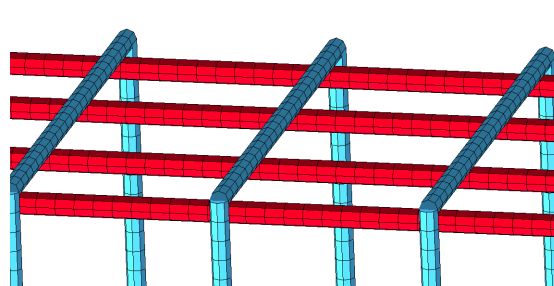
شکل 14- مدل سخت‌شوندگی ایزوتروپیک و کینماتیک در مدل رفتاری ماده شماره 3 در نرم‌افزار LS-Dyna

جدول 4- مقادیر پارامترهای استفاده‌شده برای معرفی مدل ماده شماره 3 به آرماتورها

| پارامتر | توضیحات     | مقدار     |
|---------|-------------|-----------|
| RO      | چگالی       | 0.00783   |
| E       | مدول ینگ    | 2.100e+05 |
| PR      | ضریب پواسون | 0.3       |
| SIGY    | تنش تسلیم   | 460       |
| ETAN    | مدول مماسی  | 664       |

### 3-5- پارامترهای تحلیل مورد استفاده

در ابتدای توسعه نرم‌افزار LS-Dyna، تمرکز آن صرفاً بر روی تحلیل‌های دینامیکی، انفجاری و ضربه‌ای بود. این محدودیت به کاربرد حل‌گر Explicit در نرم‌افزار منجر شد، که برای مسائل با زمان پاسخ کوتاه، مانند ضربه، بسیار مناسب است. با این حال، این روش برای مسائل بازمان بارگذاری طولانی، مانند تحلیل‌های شبه



شکل 13- نحوه قرارگیری آرماتورهای طولی و عرضی در مدل عددی ساخته‌شده در محیط نرم‌افزار LS-Dyna

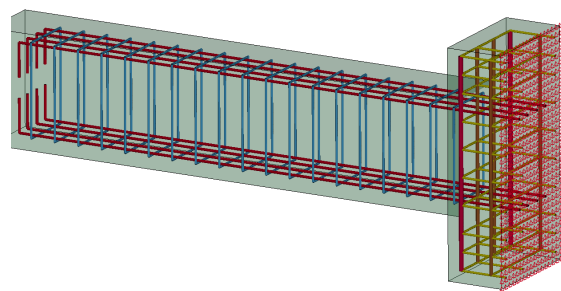
مزیت این راه این است که کمترین بار محاسباتی را به همراه خواهد داشت. ولی یکی از بزرگ‌ترین اشکالات این کار، این است که طول مهار آرماتورهای طولی کاهش می‌یابد و به همین دلیل، شکل کمناشی مطابق با مدل آزمایشگاهی را منتج نمی‌شود. به همین دلیل این مطالعه مجبور به استفاده از راه دوم یعنی تعریف تماس<sup>1</sup> بین آرماتورهای طولی و عرضی شده است. نرم‌افزار LS-Dyna انواع مختلفی از تماس را برای اضافه نمودن در مدل عددی پشتیبانی می‌کند. با این حال با توجه به ماهیت مدل عددی و همچنین تماس دو المان از نوع تیر (المان فولادی آرماتور از نوع تیر مدل‌سازی شده است) تماس از نوع CONTACT\_AUTOMATIC\_SURFACE\_TO\_SURFACE\_MOR TAR\_TIED استفاده شده است. این نوع تماس برای تمامی آرماتورهای طولی و عرضی در تیر و ستون نمونه بتنی استفاده شده است. با استفاده از این روش، می‌توان آرماتورهای طولی و عرضی را همانند مدل آزمایشگاهی در محیط LS-Dyna همان‌طور که در

شکل (13) مشاهده می‌شود، به یکدیگر اتصال داده و مدل‌سازی نمود.

مورد بعدی که در این قسمت باید به آن پرداخته شود، مدل‌سازی جدا نمودن اتصال بین آرماتور و بتن در محور طولی آرماتور می‌باشد، چراکه بتن هسته در جهت عمود به صفحه به آرماتورهای طولی نیرو وارد خواهد نمود و فقط در راستای طولی میلگرد و در محل مفصل پلاستیک باید لغزش آرماتور را ایجاد نمود. برای این امر در این پژوهش به این صورت اقدام شده است. ابتدا مقدار 30 سانتی‌متر از میلگردهای ناحیه مفصل پلاستیک را به یک قطعه یا Part دیگر منتقل می‌شود. حال برای در نظر گرفتن اندرکنش این قطعه با بتن از قید \*CONSTRAINED\_LOGRANGE\_IN\_SOLID استفاده می‌شود. در این نوع قید می‌توان جهت‌های مورد نظر فولاد و بتن با یکدیگر مقید شوند و با استفاده از پارامتر CTYPE کنترل شوند. با انتخاب

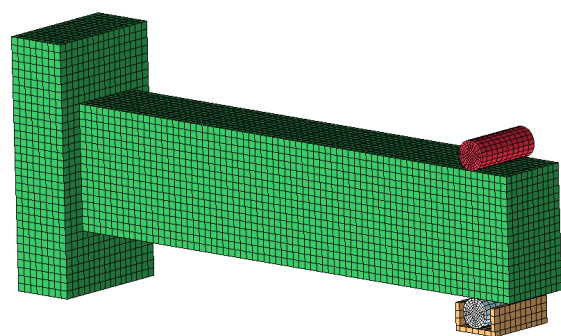


در نرم افزار است. در مدل های واقعی آزمایشگاهی به دلیل شرایط مرزی باید اتصال بتنی را به گونه ای در نظر گرفته می شد که در هر دو سمت ستون بتنی تیر قرار دارد. ولی در حل مسئله اجزای محدود می توان بنابر تقارن صفحه ای، فقط نصف مدل را در نظر گرفت و با این کار در زمان حل به مقدار قابل توجهی صرف جویی کرد. در شکل (15)، تیر مدل سازی شده با توجه به تقارن صفحه ای و همچنین آرماتورهای داخل آن به خوبی مشاهده می شود.



شکل 15- شرایط هندسی نمونه و مدل سازی آن در نرم افزار LS-Dyna

یکی دیگر از مواردی که باید در تحلیل اجزای محدود مورد نظر قرار بگیرد، اندازه مش بندی و نوع آن در مسئله است. نرم افزار LS-dyna استفاده از انواع المان ها را برای هر مسئله ای ممکن می سازد. از بین این نوع از المان ها، برای المان های بتنی از ELFORM برابر با مقدار یک از نوع SOLID و برای المان های فولادی (آرماتورها) از مقدار ELFORM برابر با یک از نوع BEAM استفاده شده است.



شکل 16- مش بندی و شرایط تکیه گاهی نمونه بتنی مدل سازی شده در نرم افزار LS-Dyna

تکیه گاه یا شرایط مرزی در یک مسئله اجزای محدود، از دیگر مواردی است که باید در نظر گرفته شود. در این مدل سازی، با استفاده از دو تکیه گاه غلتکی در بالا و پایین انتهای تیر، همان طور که در تست های آزمایشگاهی از این نوع تکیه گاه استفاده شده است، در مدل عددی نیز گنجانده شده است (در شکل (16) شکل

استاتیک، ناکارآمد و پرهزینه است. در نتیجه، افزودن حل گر Implicit به نرم افزار ضروری شد و این حل گر برای اولین بار در نسخه 950 به صورت محدود عرضه شد (Pathy و Borrval, 2016). در حالی که تحلیل Implicit از پایداری بالایی برخوردار است، اما دستیابی به همگرایی در تمام گام های تحلیل یکی از چالش های اصلی است که این روش با آن روبرو می شود (Erhart, 2016). در این پژوهش نیز به دلیل این که بارگذاری انجام شده به صورت شبه استاتیکی است، تحلیل انجام شده نیز به روش Implicit انجام خواهد شد.

#### جدول 5- پارامترهای مورد نیاز در معرفی تحلیل Implicit در

| نرم افزار LS-Dyna |         |                           |
|-------------------|---------|---------------------------|
| مقدار             | پارامتر | کارت کنترل                |
| 1                 | IMFLAG  | *CONTROL_IMPLICIT_GENERAL |
| 1.0               | DT0     |                           |
| 2                 | IMFORM  |                           |
| 2                 | IGS     |                           |
| 1                 | IAUTO   | *CONTROL_IMPLICIT_AUTO    |
| 11                | ITEOPT  |                           |
| 5                 | ITEWIN  |                           |
| 1.00E-20          | DTMIN   |                           |
| 100               | DTMAX   | CONTROL_IMPLICIT_SOLU*    |
| 12                | NSOLVR  |                           |
| 11                | ILIMIT  |                           |
| 15                | MAXREF  |                           |
| 0.001             | DCTOL   | TION                      |
| 0.01              | ECTOL   |                           |
| 1.000e-30         | ABSTOL  | *CONTROL_IMPLICIT_SOLVER  |
| 2                 | DNORM   |                           |
| 2                 | LSOLVR  |                           |
| 2                 | AUTOSPC |                           |

برای تحلیل به روش Implicit نیاز است تا چند کارت کنترل به نرم افزار معرفی شود. این کارت های کنترل عبارت اند از:

- \*IMPLICIT\_GENERAL - ۱
- \*IMPLICIT\_AUTO - ۲
- \*IMPLICIT\_SOLUTION - ۳
- \*IMPLICIT\_SOLVER - ۴

هر یک از این چهار کارت کنترل پارامترهای مختلفی دارد که بنا بر نوع مسئله مورد حل، می تواند بسیار متفاوت باشد و باید با به شرایط زمانی، همگرایی تحلیل، تعیین شوند. تعدادی از این پارامترها را می توان در جدول (5) مشاهده نمود. با توجه به نمونه بتنی و همچنین مقدار زمان تحلیل، پارامترهای در نظر گرفته شده را می توانید در همین جدول مشاهده نمایید. توضیحات مربوط به هریک از این پارامترها در راهنمای نرم افزار آورده شده است که توضیح آن از چارچوب این پژوهش خارج است.

#### 4-5- شرایط مرزی و هندسی نمونه عددی

یکی دیگر از قسمت هایی که برای حل یک مسئله به روش اجزای محدود مورد نیاز است، تعیین هندسه و شرایط مرزی مسئله

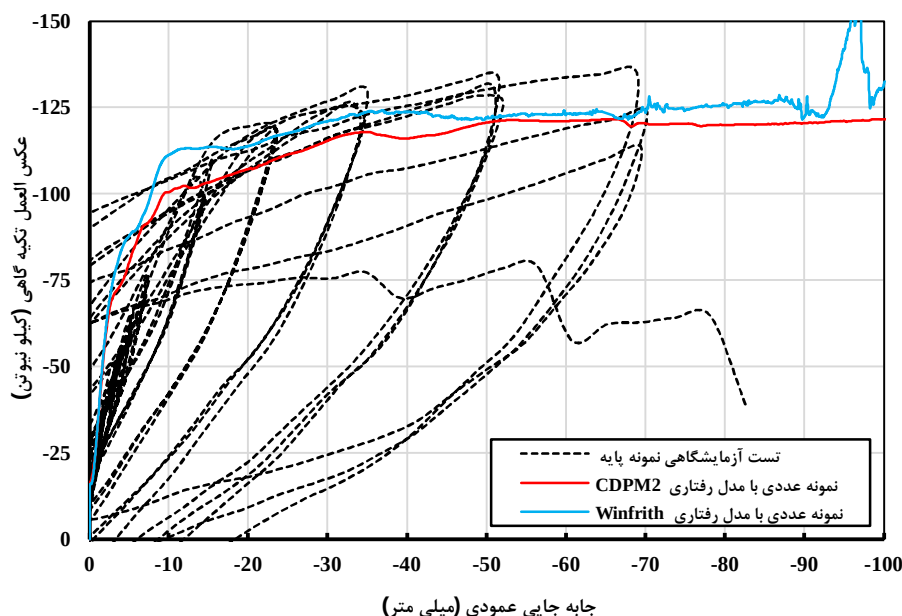
همان‌طور که عنوان شد، در این قسمت ابتدا مدل عددی ساخته‌شده در نرم‌افزار LS-Dyna را با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده تا انطباق آن را با این نتایج مورد سنجش قرار گیرد. ذکر این نکته ضروری است که در مدل‌های عددی بتنی به‌دلیل ماهیت رفتار بتن، هیچ‌گاه خطای به‌دست‌آمده از مدل‌سازی عددی بسیار کم نخواهد بود و همیشه درصد خطایی بین نتایج آزمایشگاهی و عددی وجود خواهد داشت.

نتایج عددی نمونه پایه (نمونه اول) با دو مدل رفتاری مختلف بتن در مقایسه با نتایج آزمایش چرخه‌ای آن در شکل (17) آورده شده است. همان‌طور که در این نمودار مشاهده می‌شود، نمونه عددی با دو مدل رفتاری مختلف در ناحیه الاستیک (ناحیه خطی) کاملاً با یکدیگر منطبق بوده و نشان از یکسان بودن نتایج این دو مدل رفتاری بتن در این ناحیه را می‌دهد.

16 این تکیه‌گاه‌های غلتکی مشاهده می‌شود). این تکیه‌گاه‌های غلتکی در نرم‌افزار با استفاده از المان‌های صلب یا Rigid مدل‌سازی شده است که مقطع و مصالح مربوط به خود را باید در نرم‌افزار اضافه نمود.

## 6- نتایج مدل‌سازی عددی و مقایسه با نتایج آزمایشگاهی

پس از بررسی تمام نکات مربوط به مدل‌سازی عددی نمونه پایه (نمونه اول) و نمونه دارای جداساز بین آرماتور طولی و بتن در طول ناحیه پلاستیک (نمونه دوم)، حال نوبت به بررسی نتایج به‌دست‌آمده از تحلیل عددی این نمونه‌ها می‌باشد. به‌منظور بررسی صحت مدل عددی تهیه‌شده در نرم‌افزار، ابتدا باید این مدل عددی را با رفتار به‌دست‌آمده از آزمایش تجربی، مقایسه نمود. در این قسمت برای نمونه پایه (نمونه اول) با تحلیل نمونه عددی تحت بار یکنوا و مقایسه آن با نتایج به‌دست‌آمده از آزمایش، صحت مدل عددی بررسی و تعیین می‌شود.

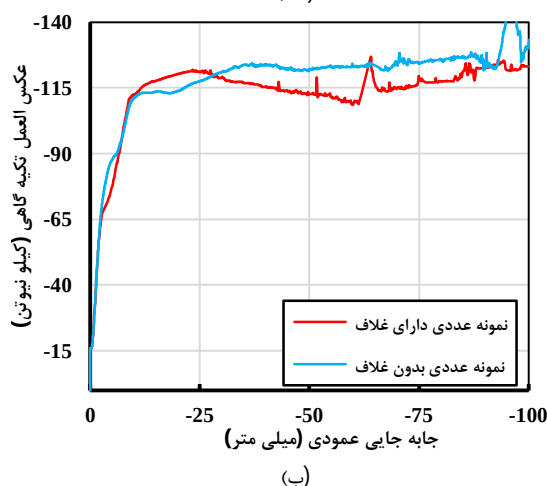
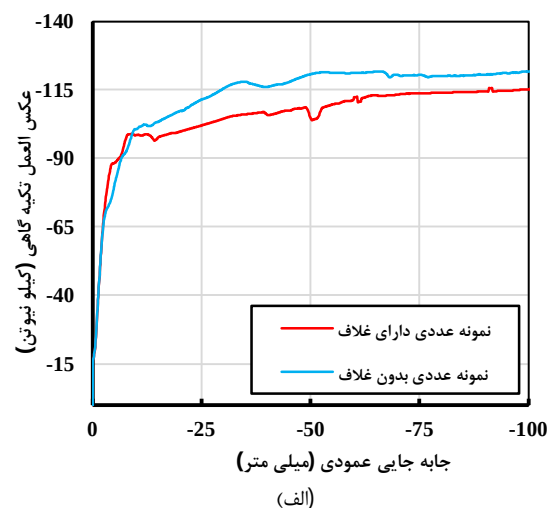


شکل 17- مقایسه نمودار بار - جابه‌جایی عمودی تست آزمایشگاهی در نمونه پایه (نمونه اول یا B1) با نمونه‌های عددی مدل‌سازی شده با مدل رفتاری بتن شماره 273 و 84 (مدل رفتاری CDPM و Winfrith)

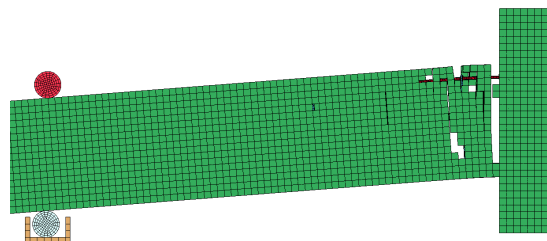
دچار کمانش شده است ولی در نمونه با مدل رفتاری CDPM میلگردهای طولی کمانشی را از خود نشان نمی‌دهد. با توجه به این‌که در نمونه آزمایشگاهی در پایان آزمایش، میلگردهای طولی کاملاً دچار کمانش می‌شوند، مدل رفتاری Winfrith انطباق بیشتری را نسبت به مدل آزمایشگاهی نشان می‌دهد.

ولی در ناحیه غیرخطی (پس از تسلیم)، در مدلی که با رفتار شماره 84 یا Winfrith مدل‌سازی شده است، مقداری بیشتر از مدل با رفتار شماره 273 یا CDPM می‌باشد. این تغییرات به‌دلیل مختلف بودن فرمولاسیون و همچنین مکانیزم خرابی این دو مدل رفتاری می‌باشد. در حالت نهایی یا لحظه گسیختگی نیز این دو مدل رفتاری مقداری با یکدیگر اختلاف دارند. در شکل (18) این اختلاف در لحظه نهایی یا لحظه گسیختگی مشاهده می‌شود. با توجه به این شکل، میلگردهای طولی در نمونه رفتاری Winfrith

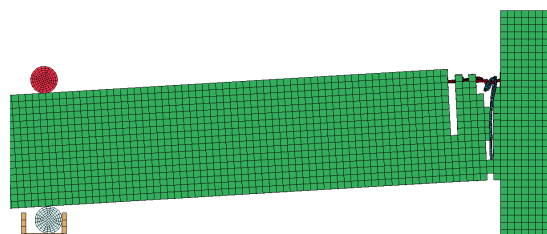
مشاهده می‌شود که با استفاده از جداسازی بتن از میلگردهای فولادی، با این که مقداری از مقاومت نهایی نمونه کاسته شده، ولی میزان خرابی کاهش داشته و همچنین میلگردهای طولی در نمونه دارای غلاف، کم‌انرژی را از خود نشان نداده‌اند. با توجه به این تحلیل‌ها می‌توان نتیجه گرفت که با استفاده از غلاف در محل مفصل پلاستیک میزان خرابی‌ها و ترک‌ها در محل اتصال کاهش می‌یابد. همچنین با بررسی گسیختگی مدل رفتاری CDPM، مشاهده می‌شود که با استفاده از غلاف و جداسازی بتن از فولادهای طولی، اکثر ترک و خرابی‌ها در ناحیه مفصل پلاستیک جمع شده است و به بقیه تیر منتقل نمی‌شود. در قسمت آخر، بررسی اختصاص به کرنش طولی در یکی از المان‌های آرماتور طولی در ناحیه مفصل پلاستیک دارد. در شکل (21)، منحنی‌های مربوط به کرنش‌های طولی این المان از آرماتورهای ناحیه مفصل پلاستیک در دو مدل رفتاری بتن آورده شده است.



**شکل 19- مقایسه تحلیل‌های عددی نمونه‌های دارای غلاف و بدون غلاف در محل مفصل پلاستیک با دو مدل رفتاری بتن مختلف: الف) نمونه‌های عددی با مدل رفتاری بتن CDPM، ب) نمونه‌های عددی با مدل رفتاری بتن Winfrith**



(الف)



(ب)

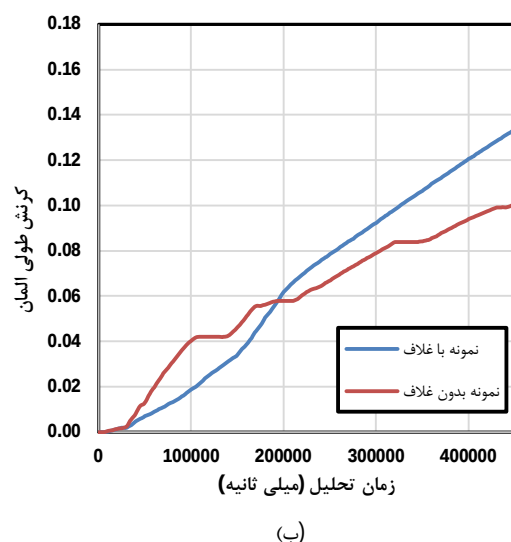
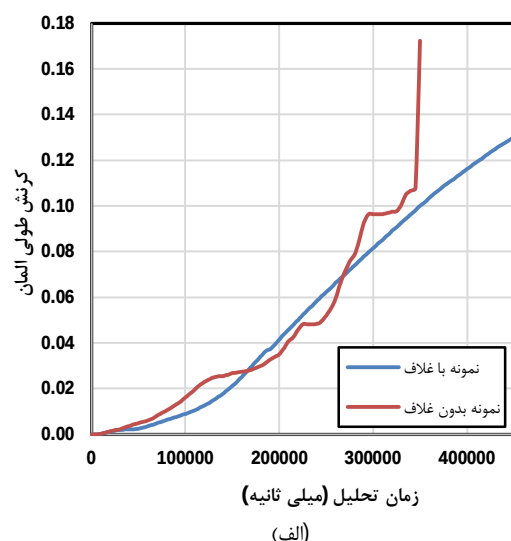
**شکل 18- مقایسه شکل نهایی گسیختگی در مدل عددی پایه با دو مدل رفتاری متفاوت: الف) نمونه پایه (نمونه اول) با مدل رفتاری CDPM، ب) نمونه پایه (نمونه اول) با مدل رفتاری Winfrith**

در قسمت بعدی، رفتار نمونه‌های عددی با جداسازی مورد بحث و بررسی قرار خواهد گرفت. همانند نمونه پایه یا نمونه اول، نمونه دوم یا نمونه دارای غلاف پلاستیکی هم با دو مدل رفتاری بتنی متفاوت با شماره‌های 273 و 84 مورد بررسی قرار گرفته است. در نمودار شکل (19)، می‌توان مقایسه‌ای از این مدل عددی با حالت پایه (نمونه اول) را که با دو مدل رفتاری بتن تحلیل شده است، مشاهده نمود. با توجه به نمودارهای این شکل، مشاهده می‌شود که مقاومت نهایی نمونه بدون غلاف مقداری بیشتر از نمونه با غلاف می‌باشد. همچنین در نقطه شروع رفتار غیرخطی در دو مدل رفتاری 84 و 273، این دو نمونه با یکدیگر متفاوت است ولی در محدوده خطی کاملاً با یکدیگر منطبق می‌باشند.

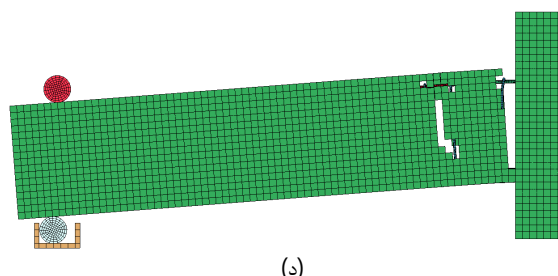
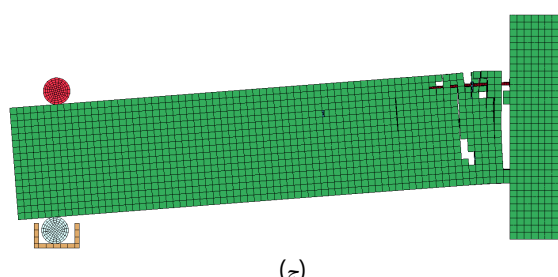
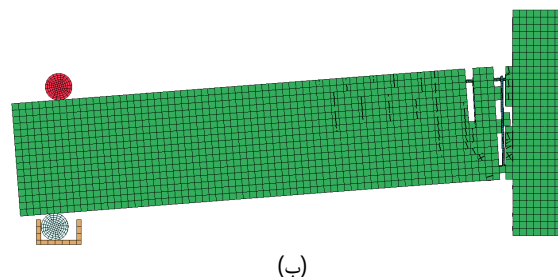
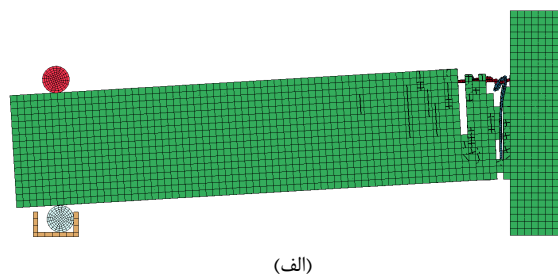
پس از بررسی منحنی‌های نیرو- جابه‌جایی مدل‌های عددی بدون جداسازی (بدون غلاف) با نمونه‌های دارای غلاف جداکننده آرماتورهای طولی از بتن، نوبت به بررسی شکل گسیختگی آن‌ها در لحظه نهایی تحلیل می‌باشد. در شکل (20)، مقایسه‌ای از لحظه گسیختگی نهایی مدل‌های عددی تحلیل شده با دو مدل رفتاری مختلف بتن CDPM و Winfrith نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود در هر دو مدل رفتاری بتن، با تغییر مشخصات چسبندگی فولاد و بتن به یکدیگر، حالت نهایی گسیختگی تغییر پیدا می‌کند. با تحلیل مدل‌ها با استفاده از مدل رفتاری Winfrith می‌توان خروجی ترک‌ها را در فایل جداگانه با فرمت d3crack ذخیره و هنگام فراخوانی فایل‌های پس‌پردازش، الگوی ترک‌ها را همان‌طور که در شکل (20-الف) و (20-ب) نشان داده شده است، مشاهده نمود. با بررسی این مدل رفتاری بتن

محوری المان فولادی نمونه با غلاف، تنها در قسمت نیمه ابتدایی بارگذاری کمتر از کرنش محوری المان فولادی بدون غلاف می‌باشد و پس از آن روند صعودی از خود نشان می‌دهد. همچنین مشاهده می‌شود که نمودار کرنش در نمونه بدون غلاف در هر دو مدل رفتاری تقریباً یکسان بوده و با تغییر مدل رفتاری بتن، تفاوتی در آن مشاهده نمی‌شود، ولی با ایجاد چسبندگی بین فولاد و بتن، مقدار توزیع کرنش در المان فولادی (آرماتورهای طولی) تغییر بسیار چشم‌گیری خواهد داشت.

در مدل عددی که آرماتورهای طولی از خود کمانش نشان دادند (مدل Winfrith) تغییر مکان جانبی در امتداد محور عمود بر محور طولی آرماتورهای اصلی در شکل (22) قابل مشاهده می‌باشد.



شکل 20- مقایسه کرنش محوری در یک المان از آرماتورهای طولی در نمونه‌های عددی با و بدون چسبندگی فولاد و بتن در مدل‌های رفتاری بتن Winfrith و CDPM: (الف) مدل رفتاری Winfrith، (ب) مدل رفتاری CDPM



شکل 20- مقایسه حالت گسیختگی در نمونه‌های بدون غلاف و با غلاف با دو مدل رفتاری: (الف) بدون غلاف (مدل رفتاری Winfrith)، (ب) با غلاف (مدل رفتاری Winfrith)، (ج) بدون غلاف (مدل رفتاری CDPM)، (د) با غلاف (مدل رفتاری CDPM)

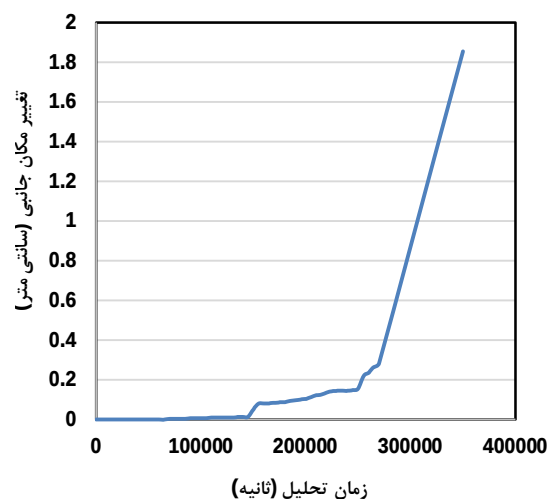
با توجه به شکل (21-الف) که نمودار کرنش محوری در المانی از آرماتور طولی را در مدل رفتاری Winfrith نشان می‌دهد، مشاهده می‌شود که در نمونه عددی دارای جداسازی فولاد از بتن (نمونه با غلاف) کرنش در کل زمان تحلیل تقریباً از حالت بدون جداسازی کمتر می‌باشد و نمونه بدون غلاف پیش از رسیدن زمان پایان تحلیل، دچار کمانش (افزایش ناگهانی کرنش در نمودار) شده و المان گسیخته می‌شود. در (21-ب) این شکل، نمودار کرنش محوری از همان المان در مدل رفتاری CDPM نشان داده شده است. در این مدل رفتاری، برخلاف مدل رفتاری قبل، کرنش

ایجاد شده در ناحیه مفصل پلاستیک را به صورت قابل توجهی کاهش داد. مشاهدات بعد از آزمایش نشان داد که تعداد ترک‌ها از 69 در نمونه اول (نمونه مینا) به 30 ترک در نمونه دوم (نمونه با غلاف) رسیده است که نشان‌دهنده کاهش 56 درصدی نسبت به نمونه اول است. ترک‌های ایجاد شده در نمونه با غلاف بیشتر به صورت ترک‌های خمشی می‌باشد که این خود نشان‌دهنده کاهش نیروهای برشی در محل اتصال می‌باشد. همین‌طور تمرکز خرابی‌ها بیشتر در محل اتصال رخ داده و به بقیه تیر بتنی انتقال پیدا نخواهد کرد. در مورد کماتش آرماتورهای طولی، می‌توان دریافت که با استفاده از غلاف پلاستیکی و ایجاد جداسازی بین فولاد و بتن در ناحیه مفصل پلاستیک، می‌توان نوع یا مود کماتش آرماتورهای طولی را از کماتش کلی (کوماتش بین چند آرماتور عرضی) به کماتش محلی (کوماتش بین دو خاموت) تغییر داد. با بررسی مقدار خرابی‌ها در بین دو نمونه آزمایش شده، مشاهده شد که با استفاده از سیستم غلاف پلاستیکی در ناحیه مفصل پلاستیک برای میلگردهای طولی، می‌توان خسارت ایجاد شده در مفصل پلاستیک را کاهش و ایمنی سازه را افزایش داد. عرض ترک‌ها در نمونه دوم نسبت به نمونه اول و همچنین مقدار خرابی‌ها کاهش یافت. این نوع از سیستم را می‌توان به عنوان یک راهکار اقتصادی و مفید برای افزایش تاب‌آوری سیستم باربری جانبی و ایمنی آن، به آیین‌نامه‌های ساختمانی پیشنهاد نمود.

در بررسی‌های صورت گرفته بر روی مدل‌های عددی، دو مدل رفتاری بتنی برای نمونه‌ها در نظر گرفته شد که این دو مدل رفتاری در ناحیه خطی و الاستیک رفتار دقیقاً یکسان و در ناحیه غیرخطی با این‌که با یکدیگر اختلاف داشتند ولی تا حد بسیار زیادی مقاومت آزمایشگاهی را به درستی تخمین زدند. همچنین بررسی نمونه‌های عددی نشان داد که با استفاده از جداسازی اتصال فولاد و بتن از یکدیگر، می‌توان مقدار خرابی را در ناحیه مفصل پلاستیک کاهش داد. بررسی کرنش‌های محوری در نمونه‌های عددی نشان داد که با استفاده از جداسازی اتصال، می‌توان به توزیع کرنش یکنواختی در آرماتورهای طولی مفصل پلاستیک رسید که این امر باعث کاهش تمرکز تنش و کرنش در میلگردهای طولی مفصل پلاستیک خواهد شد.

## 8- مراجع

- Asgarpoor M, Gharavi A, Epackachi S, "Investigation of various concrete materials to simulate seismic response of RC structures. Structures, 2021, 29, 1322-1351.  
<https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.11.042>  
 Bao Y, Lew HS, Sadek F, Main J, "A simple means for reducing the risk of progressive collapse", Concrete international, 2013, 35, 33-38.  
<https://doi.org/10.1061/9780784413357.194>



شکل 21- تغییر مکان جانبی نقطه‌ای آرماتورهای طولی کماتش یافته در مدل با مدل رفتاری بتن Winfrith

همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، پس از تخریب بتن پوشش (کاور) در مجاورت مفصل پلاستیک، یک افزایش ناگهانی در تغییر مکان جانبی المان‌های فولادی اصلی یا طولی، مشاهده می‌شود. پس از این ناحیه و افزایش نیروها و کرنش‌های طولی، یک افزایش ناگهانی شدیدتر در تغییر مکان جانبی، بیانگر کماتش این المان از میلگرد طولی در قسمت پایانی بارگذاری می‌باشد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که مدل عددی تهیه شده در این قسمت، قابلیت شبیه‌سازی رفتار کماتشی آرماتورهای طولی را در نمونه‌های تیرستون ساخته شده را دارد.

## 7- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این پژوهش سعی شد تا با بررسی آزمایشگاهی و عددی نمونه‌های بتن مسلح تیرستون در ابعاد واقعی، اثر جداسازی آرماتورهای طولی در ناحیه مفصل پلاستیک مورد بررسی قرار گیرد. همچنین در این آزمایشات سعی شده است تا نحوه کماتش میلگردهای طولی مورد بررسی قرار گیرد. تحقیقات آزمایشگاهی بر روی دو نمونه تیرستون با بارگذاری چرخه‌ای اعمال شده بر روی ستونک میانی انجام شده است. تحقیقات عددی نیز با استفاده از روش اجزای محدود در نرم‌افزار LS-Dyna و تحلیل Implicit بر روی مدل‌های ساخته شده از نمونه‌های آزمایشگاهی و معرفی دو مدل رفتاری بتن و همچنین با در نظر گرفتن اندرکنش بین آرماتورهای طولی و عرضی و جداسازی آرماتورهای طولی در طول ناحیه مفصل پلاستیک انجام شده است.

از مشاهدات صورت گرفته بر روی نمونه‌های آزمایشگاهی می‌توان به این نتیجه رسید که با استفاده از جداسازی اتصال بتن از فولاد با استفاده از غلاف پلاستیکی، می‌توان تعداد ترک‌های



- Ranasinghe K, Ashraf M, "Effect of bond on shear behavior of RC and PC beams: Experiments and FEM analysis", Japan Concrete Institute, 2001, 23, 1057-1062.
- SchwER L, "The Winfrith concrete model: Beauty or beast? Insights into the Winfrith concrete model", 8<sup>th</sup> European LS-DYNA users conference, 2011, 23-24.
- Schwer L, "Modeling rebar: The forgotten sister in reinforced concrete modeling", 13<sup>th</sup> International LS-DYNA® Users Conference, 2014.
- Takahashi Y, "Development of high seismic performance RC piers with object-oriented structural analysis", 2002.
- Takiguchi K, Okada K, Sakai M, "Deforming Characteristics of RC Members with and without Bond", Transactions of the Architectural Institute of Japan, 1976, 249, 1-11.  
[https://doi.org/10.3130/aixsax.249.0\\_1](https://doi.org/10.3130/aixsax.249.0_1)
- Wang Z, Feng P, Zhao Y, Yu T, "FRP-confined concrete core-encased rebar for RC columns: Concept and axial compressive behavior", Composite Structures, 2019, 222, 110915.  
<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.110915>
- Winkelbauer BJ, Phase I Evaluation of Selected Concrete Material Models in LS-DYNA, 2015.
- Wittmann F, Rokugo K, Brühwiler E, Mihashi H, Simonin P, "Fracture energy and strain softening of concrete as determined by means of compact tension specimens", Materials and structures, 1988, 21, 21-32. <https://doi.org/10.1007/bf02472525>
- Zhao M-Z, Lehman DE, Roeder CW, "Modeling recommendations for RC and CFST sections in LS-Dyna including bond slip", Engineering Structures, 2021, 229, 111612.  
<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111612>
- Bigaj A, Walraven J, "Size effects in plastic hinges of reinforced concrete members", Heron, 2002, 47 (2), 79-80.
- Broadhouse B, Neilson A, "Modelling reinforced concrete structures in Dyna3d", Ukaea Atomic Energy Establishment, 1987.
- Committee A, "Building code requirements for structural concrete (ACI 318-08) and commentary", American Concrete Institute, 2008.  
<https://doi.org/10.1201/9781420007657-41>
- Erhart T, "Tips and tricks for successful implicit analyses with LS-DYNA", Dynamore GmbH, 2016.
- Grassl P, Jirásek M, "Damage-plastic model for concrete failure", International Journal of Solids and Structures, 2006, 43, 7166-7196.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2006.06.032>
- Hallquist JO, "LS-DYNA® keyword user's manual: volumes I, II, and III LSDYNA R11", Livermore, California: Livermore Software Technology Corporation, Livermore, 2018.
- INSO Standard Specification for Ready-Mixed Concrete. Iran, 2016.
- Jeppsson J, Thelandersson S, "Behavior of reinforced concrete beams with loss of bond at longitudinal reinforcement", Journal of Structural Engineering, 2003, 129, 1376-1383.  
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2003\)129:10\(1376\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2003)129:10(1376))
- Kani G, "The riddle of shear failure and its solution", ACI Journal Proceedings, 1964, 61, 441-468.
- Kotsovos GM, Vougioukas E, Kotsovos MD, "Reducing steel congestion without violating seismic performance requirements", ACI Structural Journal, 2013, 110, 427-436.  
<https://doi.org/10.14359/51685600>
- Massone LM, López EE, "Modeling of reinforcement global buckling in RC elements", Engineering Structures, 2014, 59, 484-494.  
<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2013.11.015>
- Organization INS, "Hot-rolled steel bars for reinforcement of concrete-Specification and test methods (INSO 3132)", Islamic Republic of Iran, 2013.
- Ottosen NS, "A failure criterion for concrete", Journal of the Engineering Mechanics Division, 1977, 103, 527-535.  
<https://doi.org/10.1061/jmcea3.0002248>
- Panagiotou M, "Effect of hoop reinforcement spacing on the cyclic response of large reinforced concrete special moment frame beams", Pacific Earthquake Engineering Research Center, 2013.  
<https://dx.doi.org/10.14359/51740244>
- Pandey GR, "Enhancing shear capacity by controlling bond of reinforcement", Proceedings of the Japan Concrete Institute, 2005, 27, 799-804.
- Pathy S, Borrval T, "Quasi-static simulations using implicit LS-DYNA", 14<sup>th</sup> International LS-DYNA Users Conference, 2016 Detroit, MI, USA. 12-14.
- Qu Y, Wu H, Xu Z, Liu X, Dong Z, Fang Q, "Safety assessment of generation III nuclear power plant buildings subjected to commercial aircraft crash Part II: Structural damage and vibrations", Nuclear Engineering and Technology, 52, 397-416.  
<https://doi.org/10.1016/j.net.2019.07.015>