

باسمه تعالی

# پروژه بتن آرمه پیشرفته

استاد راهنما:

**دکتر علی دنواز**

تهیه و تنظیم:

**سهند مردی**

۹۴۰۲۲۵۶۸۸

دانشگاه آزاد اسلامی قزوین

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

## فهرست

۵	تعریف پروژه
۵	مشخصات آزمون ها
۸	مشخصات مصالح
۸	مطالعه با کمک تئوری اجزای محدود در نرم افزار آباکوس
۹	مدلهای ساختاری در نرم افزار
۹	مدل بتن
۹	مدل آرماتور GFRP
۹	مدل ورقهای تکیه گاهی
۱۰	المان بندی
۱۰	المان های سالید
۱۰	المان های خرپا
۱۱	مش بندی
۱۱	مدل سازی در آباکوس
۱۱	ماژول Part
۱۲	ماژول Property
۱۳	ماژول Assembly
۱۴	ماژول Step
۱۶	ماژول Interaction
۱۸	ماژول Load
۲۰	ماژول Mesh
۲۰	ماژول Job

۲۱ ..... صحت سنجی با مدل آزمایشگاهی

۲۱ ..... تیر A1N

۲۲ ..... تیر A2N

۲۳ ..... تیر A3N

۲۴ ..... تیر A4H

۲۵ ..... تیر B1N

۲۶ ..... تیر B2N

۲۷ ..... تیر B3N

۲۸ ..... تیر B4N

۲۹ ..... تیر B5H

۳۰ ..... تیر B6H

۳۱ ..... تیر C1N

۳۲ ..... تیر C2N

۳۳ ..... کنترل حداکثر نیرو و جابه جایی

۳۵ ..... نتیجه گیری

۳۶ ..... منابع

## تعریف پروژه

تیرهای عمیق با نسبت کم دهانه برشی به عمق موثر، این روزها در بسیاری از سازه ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. در سازه هایی که مقاومت در برابر خوردگی مطرح است، یک روش پرکاربرد استفاده از آرماتورهای FRP است که اخیرا بیش از پیش مورد توجه قرار گرفته است. با این حال اطلاعات کمی از رفتار بتن آرمه با آرماتورهای پلیمری در تیرهای عمیق موجود است. گزارش انتخاب شده برای بررسی عددی، یک مقاله آزمایشگاهی منتشر شده در ژورنال ACI Structural می باشد.<sup>[۱]</sup> در این مقاله رفتار تیرهای بتنی ساخته شده با آرماتورهای FRP و بدون استفاده از آرماتورهای برشی<sup>۱</sup> مورد بررسی قرار گرفته است.

تعداد ۱۲ تیر با ابعاد واقعی تحت بارگذاری خمشی چهار نقطه ای مورد بررسی قرار گرفته است که در آن متغیرهای اصلی شامل نسبت دهانه برشی به عمق موثر<sup>۲</sup>، درصد آرماتور، ارتفاع مقطع و مقاومت بتن می-باشد. نوع آرماتور مصرفی از نوع آرماتور پلیمری شیشه GFRP می‌باشد.

## مشخصات آزمون ها

تیرهای ساخته شده مطابق آیین نامه CSA-1 طراحی شده اند. نسبت دهانه برشی به عمق موثر (a/d) دامنه بزرگی از تیرهای عمیق مورد استفاده را شامل می‌شود. آزمون ها به ۳ دسته تقسیم شده اند :

مقطع تیر با ارتفاع اسمی ۳۰۰ میلی‌متر

مقطع تیر با ارتفاع اسمی ۶۰۰ میلی‌متر

مقطع تیر با ارتفاع اسمی ۱۰۰۰ میلی‌متر

برای بررسی تاثیر ارتفاع مقطع بر رفتار آزمون ها، نسبت a/d، درصد آرماتور و مقاومت بتن ثابت نگه داشته شده است اما طول ۴ ورقی که به عنوان تکیه گاه و وارد کننده نیرو در آزمایش خمشی ۴ نقطه وجود

---

<sup>1</sup> Web Reinforcement

<sup>2</sup> a/d

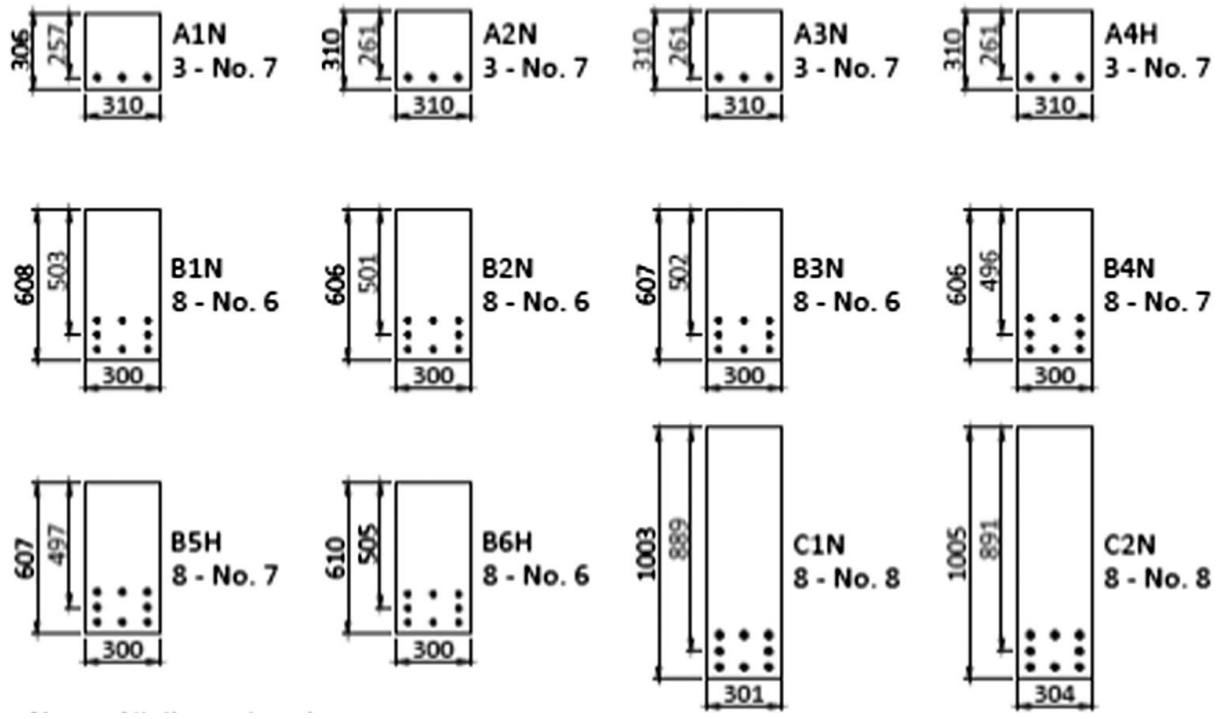
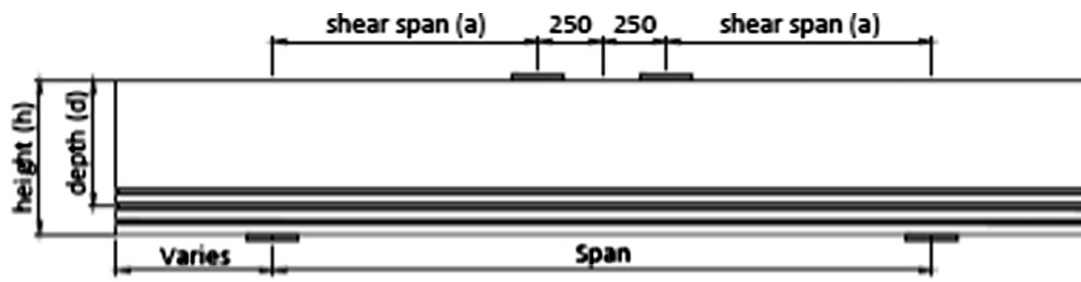
دارد، با ارتفاع مقطع (h) به صورت متوازن مقیاس شده است. عرض ورق تکیه گاهی در بیشتر آزمون ها برابر عرض تیر و حدود عدد ۳۰۰ میلیمتر می باشد.

برای بررسی تاثیر مقاومت بتن بر رفتار این آزمون ها، دو نوع بتن با رده مقاومت معمولی و بتن با رده مقاومت بالا استفاده شده است.

علت استفاده از آرماتور نوع شیشه پلیمری مدول الاستیسیته کمتر آن نسبت به آماورهای کربن پلیمری است که منجر به رسیدن به کرنش های بیشتری برای درصد آرماتور ثابتی می گردد. همچنین این نوع آرماتور پلیمری، مورد استفاده ترین آرماتور FRP در صنعت است. آزمون های با ارتفاع ۳۰۰ میلیمتر دارای یک لایه آرماتور و آزمون های با ارتفاع ۶۰۰ و ۱۰۰۰ میلیمتر دارای ۳ لایه آرماتور می باشند. کاور خالص از پایین و کناره ها ۳۸ میلیمتر می باشد. فاصله خالص میان آرماتورها به صورت عمودی ۳۸ میلیمتر می باشد.

آزمونه	a/d	٪ آرماتور	h mm	d mm	دهانه برشی a	عرض	overhang <sup>۳</sup>	مقاومت MPa
A1N	1.07	1.49	306	257	276	310	874	40.2
A2N	1.44	1.47	310	261	376	310	874	45.4
A3N	2.02	1.47	310	261	527	310	874	41.3
A4H	2.02	1.47	310	261	527	310	623	64.6
B1N	1.08	1.70	608	503	545	300	605	40.5
B2N	1.48	1.71	606	501	743	300	605	39.9
B3N	2.07	1.71	607	502	1040	300	605	41.2
B4N	1.48	2.13	606	496	736	300	814	40.7
B5H	1.48	2.12	607	497	736	300	614	66.4
B6H	2.06	1.70	610	505	1040	300	460	68.5
C1N	1.10	1.58	1003	889	974	301	826	51.6
C2N	1.49	1.56	1005	891	1329	304	821	50.7

<sup>3</sup> به فاصله میان آکس ورق تکیه گاهی تا انتهای تیر گفته می شود



ابعاد ورق های بارگذاری و تکیه گاهی برای سه دسته آزمون موجود به شرح زیر است :

برای مقطع با ارتفاع ۳۰۰ میلیمتر : ۱۰۰ × ۳۱۰ × ۳۸ میلیمتر

برای مقطع با ارتفاع ۶۰۰ میلیمتر : ۲۰۰ × ۳۰۰ × ۵۰ میلیمتر

برای مقطع با ارتفاع ۱۰۰۰ میلیمتر : ۳۳۰ × ۳۳۰ × ۳۸ برای ورق بالایی و ۳۳۰ × ۳۳۰ × ۷۵ برای ورق پایینی

سرعت بارگذاری آزمون ها حدود ۰.۲ میلیمتر در دقیقه در نظر گرفته شده است.

## مشخصات مصالح

مصالح مصرفی در این مقاله بتن و آرماتورهای GFRP می باشد. آرماتورهای شماره ۶، ۷ و ۸ استفاده شده است. با انجام آزمایش بر روی این آرماتورها مشخصات مورد نیاز آنها همچون مدول الاستیسیته، ضریب پواسون و تنش گسیختگی بدست آمده است. آرماتورهای GFRP رفتاری خطی تا لحظه شکست دارند و به صورت ترد گسیخته می شوند.

مشخصات آرماتور	شماره ۶	شماره ۷	شماره ۸
قطر اسمی	۱۹ میلیمتر	۲۲ میلیمتر	۲۵ میلیمتر
مساحت سطح مقطع	۳۲۲ میلیمتر مربع	۳۹۶ میلیمتر مربع	۵۲۸ میلیمتر مربع
تنش گسیختگی (MPa)	۷۶۵	۷۰۹	۹۳۸
مدول الاستیسیته (GPa)	۳۷.۹	۴۱.۱	۴۲.۳

دو نوع بتن معمولی و پرمقاومت استفاده شده است که در هر دو بتن بزرگترین بعد سنگدانه برابر با ۱۴ میلیمتر در نظر گرفته شده است. برای بتن معمولی مقاومت حدود ۳۵ و برای بتن پرمقاومت، مقاومت حدود ۷۰ مگاپاسکال در نظر گرفته شده است. مقاومت ها در استوانه ۱۰ در ۲۰ اندازه گیری شده است.

## مطالعه با کمک تئوری اجزای محدود در نرم افزار آباکوس

برای مطالعه عددی موارد اشاره شده از نرم افزار اجزای محدود آباکوس استفاده شده است. با کمک تحلیل غیر خطی و تئوری اجزای محدود مدل های المان محدود به صورت عددی پاسخ سازه در مقابل تیرهای عمیق دارای آرماتورهای GFRP مورد بررسی قرار گرفته است. مدل ایجاد شده به صورت عددی و با کمک نرم افزار، در برابر تمام نتایج آزمایشگاهی مورد صحت سنجی قرار گرفته است.



## مدلهای ساختاری در نرم افزار

### مدل بتن

از مدل Concrete Damaged Plasticity که در کتابخانه مصالح نرم افزار آباکوس موجود است، برای تعریف مدل بتن استفاده شده است. استفاده از این مدل در گذشته نیز نشان داده است که نتایج نزدیکی با مقادیر آزمایشگاهی دارد [۲]. برای تعیین مقادیر اصلی مورد نیاز در تعریف مدل CDP مطابق ضوابط و روابط پیشنهادی Jankowiak و Łodygowski عمل شده است [۳]. برای تعیین مقادیر تنش- کرنش و مدل خرابی بتن تحت فشار از ضوابط و روابط پیشنهادی معادله اصلاح شده Popovics استفاده شده است [۴]. برای تعیین مقادیر تنش- کرنش و مدل خرابی بتن تحت کشش از ضوابط و روابط بلاربی و اچ-سو استفاده شده است [۵]. جهت انجام این محاسبات فایل اکسلی بدین منظور فرمول نویسی شده است.

### مدل آرماتور GFRP

از آنجایی که آرماتور مورد استفاده رفتار خطی دارد بنابراین باید به صورت الاستیک تعریف شود. آرماتور پس از رسیدن به تنش نهایی، گسیخته می‌شود. این فرضیه در گذشته توسط المسلم و همکاران تایید شده است [۶]. آرماتور تا لحظه رسیدن به گسیختگی نهایی در محدوده خطی باقی می‌ماند.

### مدل ورقهای تکیه گاهی

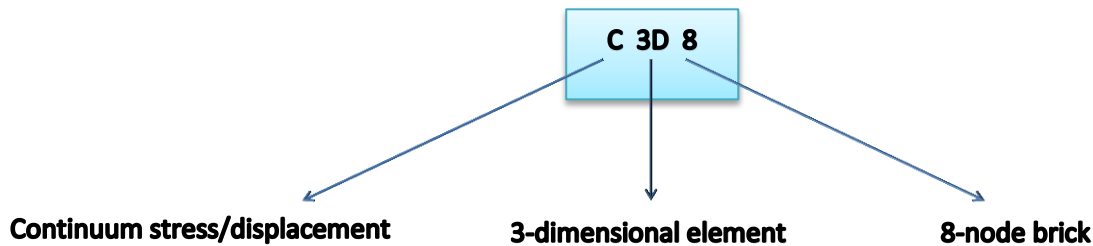
در آزمایش خمش چهار نقطه ای مذکور در این مقاله از ۴ ورق استفاده شده است که ۲ تای آن نقش تکیه گاه و ۲ تای دیگر نقش وارد کردن نیرو به آزمون را دارد. ورق‌ها از صلبیت بالایی برخوردارند و در طول آزمایش دچار تغییر شکل یا لهیدگی نمی‌شوند بنابراین رفتار آنها تنها به صورت الاستیک تعریف می‌شود.

## المان بندی

کتابخانه المان آباکوس شامل مدل‌های مختلف المان جهت تعریف در مدل‌ها می‌باشد. تمامی المان‌ها دارای قابلیت تعریف مشخصات برای مصالح مصرفی می‌باشند که میتوان المان را به صورت یک مقطع کلی برای هر مدل و یا به صورت مجزا برای هر سطح مقطع دلخواه تعریف کرد. این امر موجب می‌شود تا پاسخ غیر خطی در هر مکانی که مورد نیاز است، با دقت مناسبی در دسترس باشد.

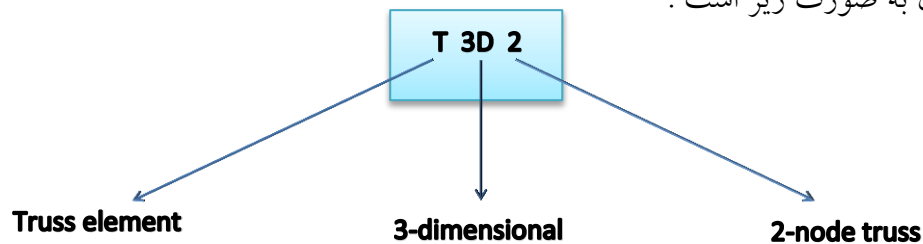
### المان های سالید<sup>۴</sup>

المان های سالید در آباکوس را می‌توان برای تحلیل خطی و یا برای تحلیل های پیچیده غیر خطی دارای سطح تماس، پلاستیسیته و تغییر شکل های بزرگ به کار گرفت. در این پروژه از المان های هشت گره ای ۳ بعدی برای مدل سازی بتن تیرهای عمیق و ورق های بارگذاری و تکیه گاهی استفاده شده است که در اصطلاح تئوری اجزای محدود به طور خلاصه به آن C3D8 گفته می‌شود. نحوه نام گذاری آن به صورت زیر است :



### المان های خرپا<sup>۵</sup>

آرماتورها وظیفه انتقال نیروهای نرمال را دارند. بدین منظور برای مدل سازی آرماتورها از المان های خرپای سه بعدی دو گره ای استفاده شده است که به طور خلاصه به آن T3D2 گفته می‌شود. نحوه نام گذاری آن به صورت زیر است :



<sup>4</sup> Solid Element

<sup>5</sup> Truss Element

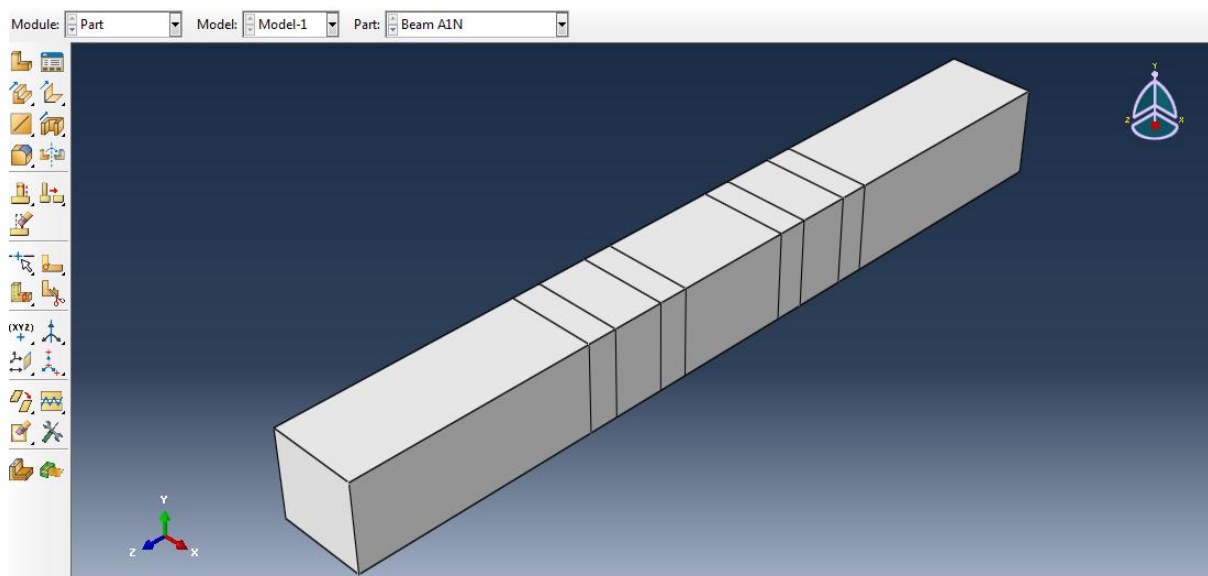
## مش بندی

برای اینکه نتایج دقیقتری از مدل اجزای محدود بتوان بدست آورد، تیرهای بتنی و آرماتورها به صورت عامدانه با سائیزی مشابه و ورقهای تکیه گاهی و بارگذاری با سائیزی ریزتر از سائیز مورد استفاده در تیر و آرماتور، مش بندی شده است. این امر باعث می شود تا بین تیر بتنی و آرماتورها که دارای دو نوع مصالح متفاوت می باشند، گره های مشترکی را با هم به اشتراک بگذارند. ریز تر بودن مش بندی ورق های انتقال دهنده نیرو به تیر و ورق های تکیه گاهی موجب توزیع نیروی بهتر و یکنواخت تر شده و از ایجاد تمرکز تنش در گره های المان تیر جلوگیری می کند. این امر موجب می شود تنش در تمام نقطه سطح المان های تیر با مش بزرگتر به صورت یکنواخت توزیع یابد.

## مدل سازی در آباکوس

### ماژول Part

در این قسمت قطعات مورد نیاز از جمله تیر بتنی، آرماتورها و ورقهای تکیه گاهی به صورت جداگانه ساخته می شوند. تیر و ورقها از نوع 3D، Solid و Deformable و آرماتورها از نوع 3D، Solid و wire می باشد. ابعاد قطعات در واحد میلیمتر وارد شده است.

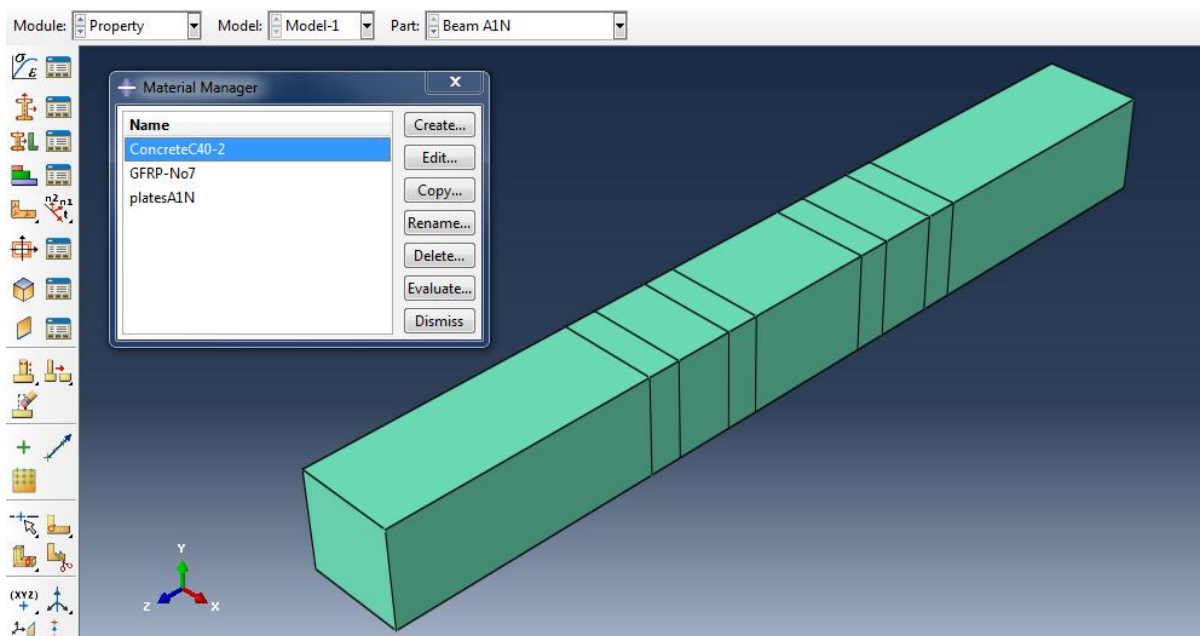


با توجه به انتخاب میلیمتر برای ابعاد قطعات، سایر واحد های نرم افزار نیز باید مطابق با میلیمتر تنظیم شوند :

Quantity	SI (mm)
Length	mm
Force	N
Mass	tonne (10 <sup>3</sup> kg)
Time	s
Stress	MPa (N/mm <sup>2</sup> )
Energy	mJ (10 <sup>-3</sup> J)
Density	tonne/mm <sup>3</sup>

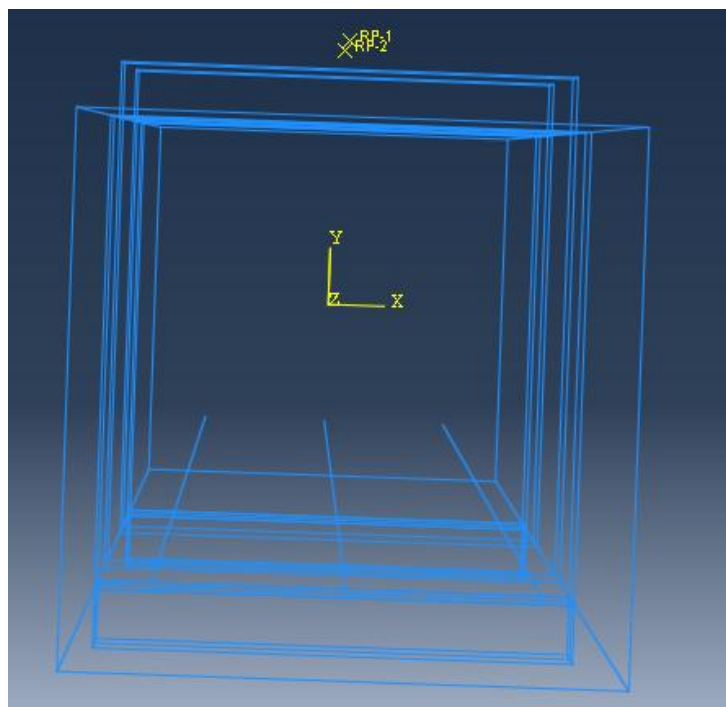
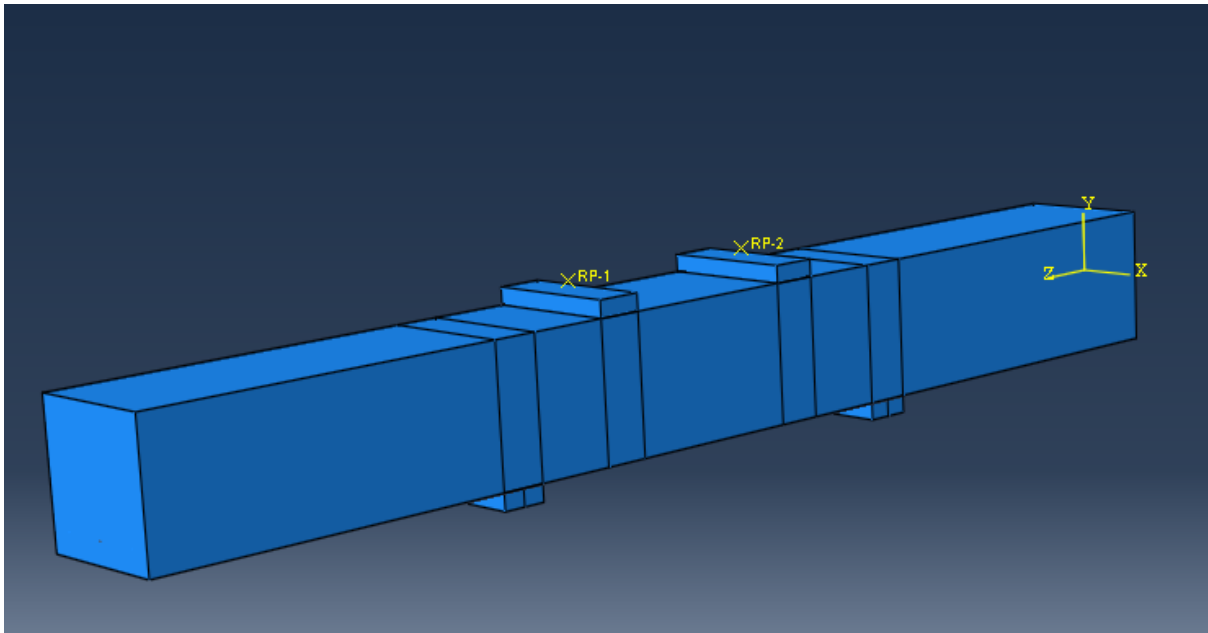
## ماژول Property

در این قسمت مشخصات مصالح و حد خرابی آنها به صورت رفتاری چند خطی مطابق با تئوری های ذکر شده در بخش "مدلهای ساختاری در نرم افزار" و داده های آزمایشگاهی موجود به عنوان ورودی تعریف می شود. در مرحله بعد پس از تعریف مشخصات مصالح باید آنها را در مقاطع ساخته شده از ماژول قبل اختصاص داد. با انجام این کار رنگ قطعات عوض شده و می توان وارد مرحله بعدی شد.



## ماژول Assembly

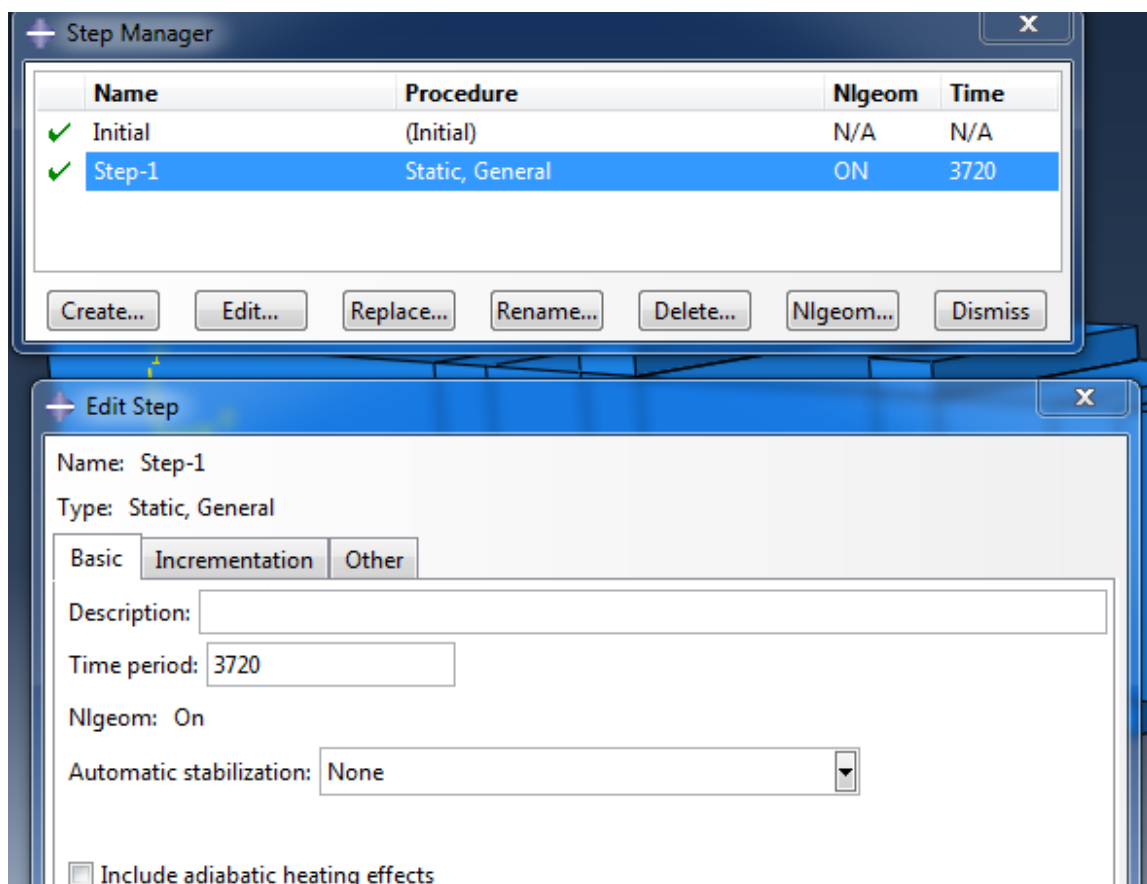
در این ماژول باید موارد ساخته شده را مونتاژ کرد. قطعات ساخته شده را وارد صفحه این ماژول کرده و در صورت نیاز از هر قطعه چند بار مونتاژ انجام می‌دهیم. سپس با استفاده از ابزارهای موجود برای چرخاندن یا انتقال قطعات و جایگذاری آنها مطابق با آنچه در آزمایشگاه ساخته شده است، اهتمام ورزیده می‌شود.



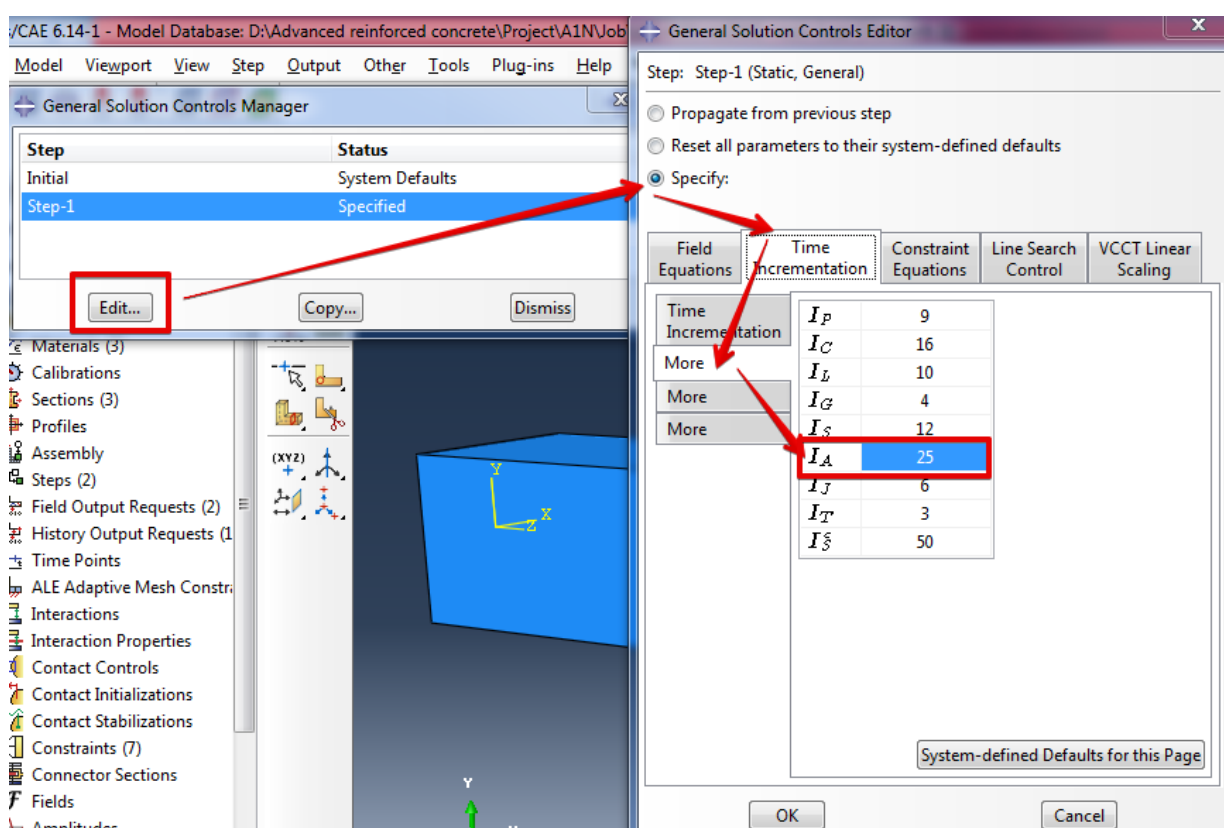
## ماژول Step

در این مرحله گام های تحلیل تعریف می شود. همواره گام اول initial step است که به صورت پیش فرض موجود است. در این گام شرایط تکیه گاهی و مشخصات مصالح قبل از تحلیل اصلی آماده سازی می شود.

Step جدیدی نیز برای مرحله اصلی تحلیل تعریف می شود. از آنجا که سرعت بارگذاری برابر با ۰.۲ میلیمتر در دقیقه به صورت جابه جایی-کنترل می باشد بنابراین میتوان از گزینه Static, General استفاده کرد زیرا سرعت بارگذاری بسیار پایین است. مقدار Time period بر اساس مدت زمان طول کشیدن هر آزمایش تعیین می شود. به منظور محاسبه آن مقدار حداکثر جا به جایی را از نتایج آزمایشگاهی برای هر نمونه استخراج کرده و با توجه به سرعت بارگذاری ۰.۲ میلیمتر بر دقیقه، می توان مدت زمان هر آزمایش را تعیین کرده و آن در قسمت Time period وارد کرد.

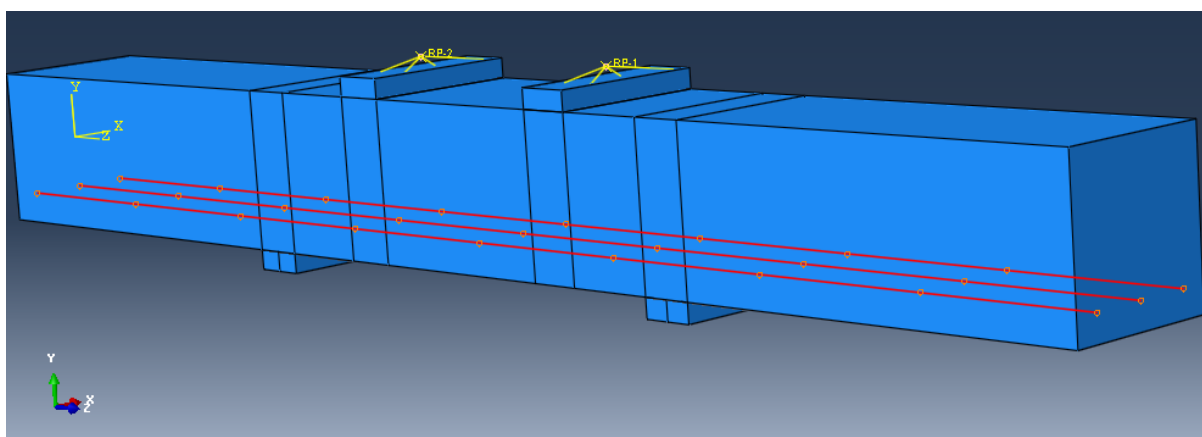


در قسمت Incrementation مقادیر زمانی اولیه، حداقل و حداکثر افزایش برای هر نوبت در بازه زمانی Time Period تعریف می‌شود. برای افزایش تعداد تلاش برای حل مسئله و کم کردن مقدار افزایش بازه زمانی (که در مدل‌های با پلاستیسیته بالا بسیار اتفاق می‌افتد) از منوی Other و General Solution Control تعداد Attempt مجاز برای کوچک کردن بازه افزایش زمان را از عدد ۵ که به صورت پیش فرض است به عدد ۲۵ تغییر می‌دهیم. این کار از خطاهای مرسوم در مدل‌های دارای پلاستیسیته در تحلیل رفتار غیر خطی جلوگیری می‌کند.

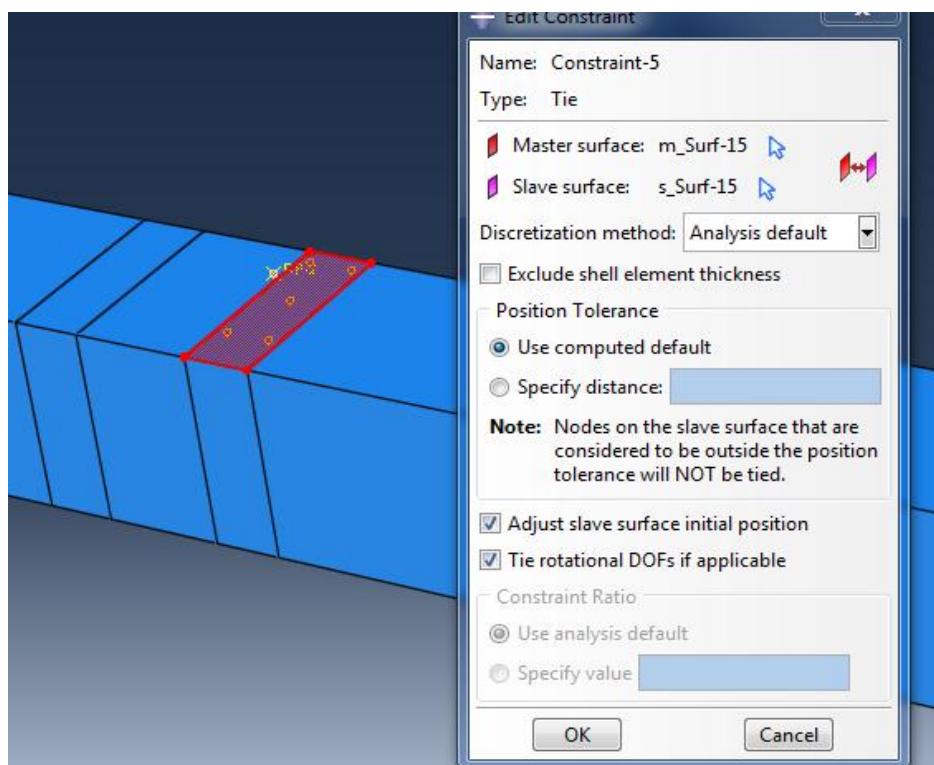


## ماژول Interaction

در این قسمت ارتباط میان اجزای مونتاژ شده با یکدیگر تعریف می‌شود. برای مثال آرماتورهای درون بتن طبق توضیح مقاله [۱] در تماس کامل با بتن هستند و حرکتی جداگانه نمی‌تواند داشته باشد. به همین دلیل اندرکنش آرماتورها با بتن از نوع Embedded Region تعریف شده است.

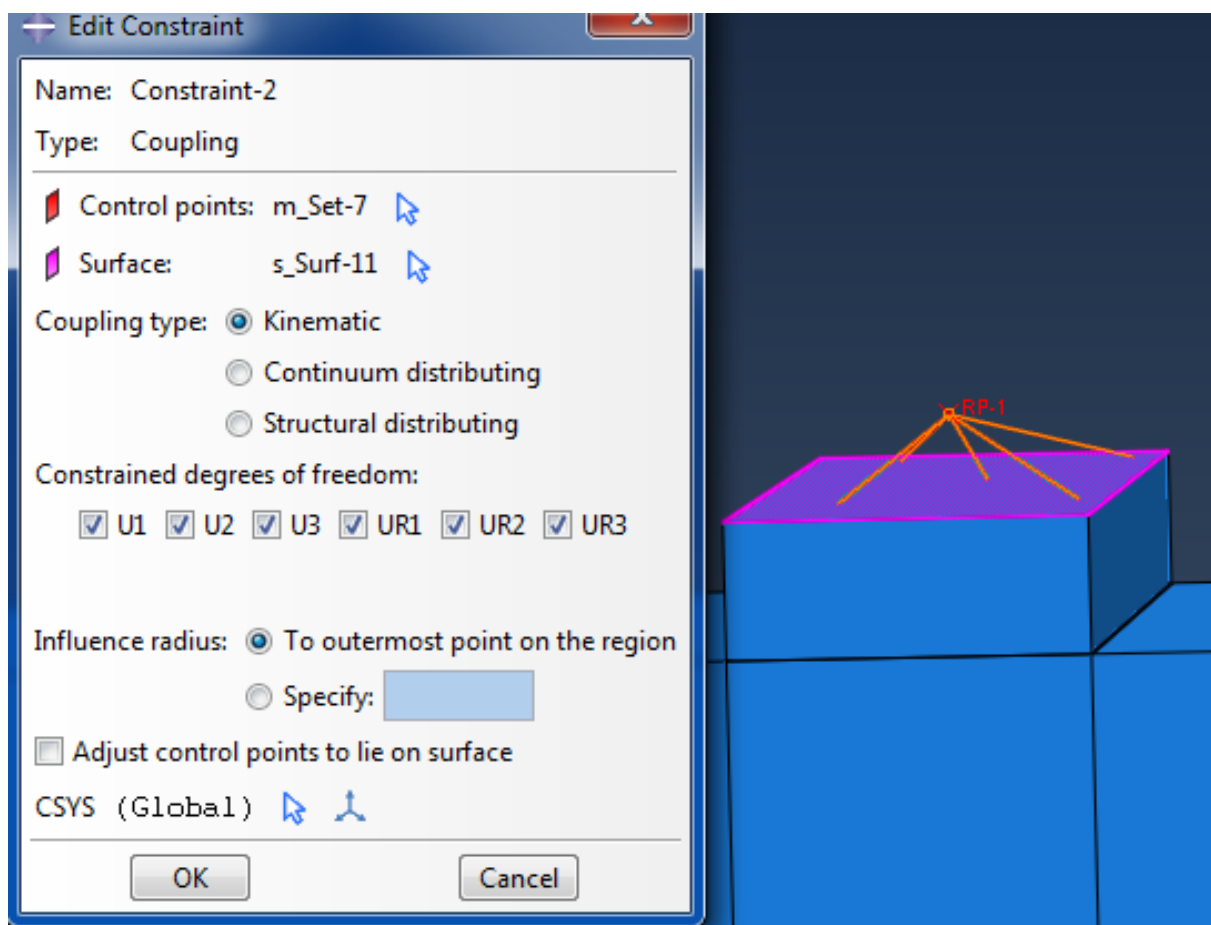


ورقهای تکیه گاهی برای جلوگیری از حرکت خارج از صفحه تیر و یا لغزیدن آن به صورت Tie به تیر متصل شده است.



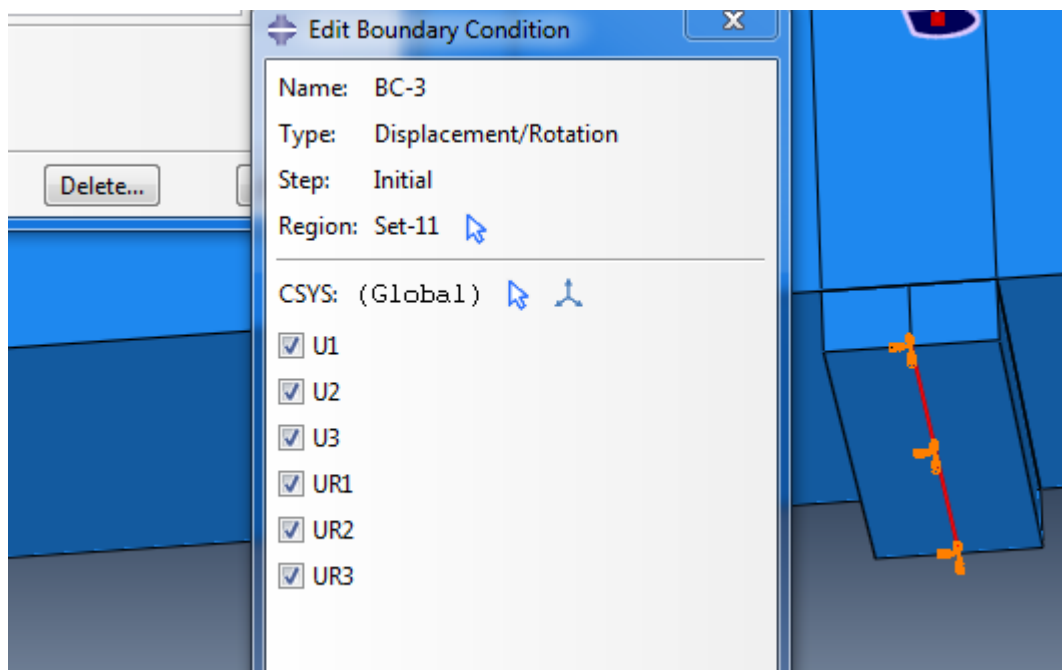
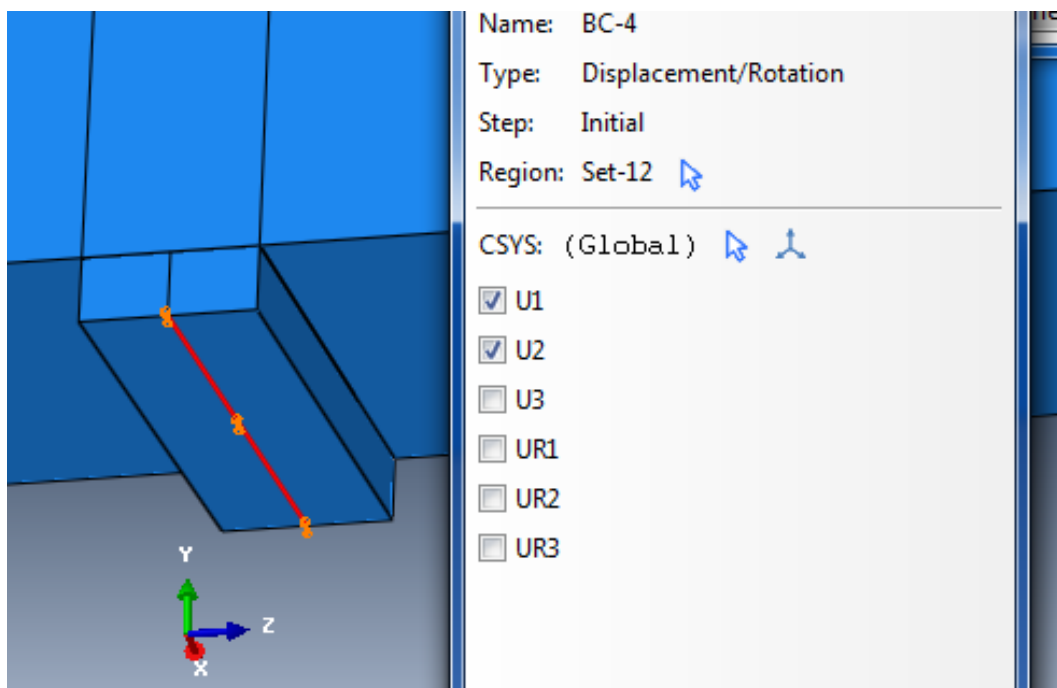


برای اعمال بار به صورت یکنواخت در هر دو ورق قرار داده شده در بالای تیر و انتقال متوازن آن به تیر ،  
۲ نقطه مرجع در بالای هر کدام از ورقهای بارگذاری تعریف شده است که این دو نقطه هر کدام به روش  
Coupling به ورق زیرین خود کوپل شده اند. این کار باعث می شود هر حرکت و باری که به نقاط وارد  
می شود، به صورت متوازن در ورقهای بارگذاری نیز اعمال شود.

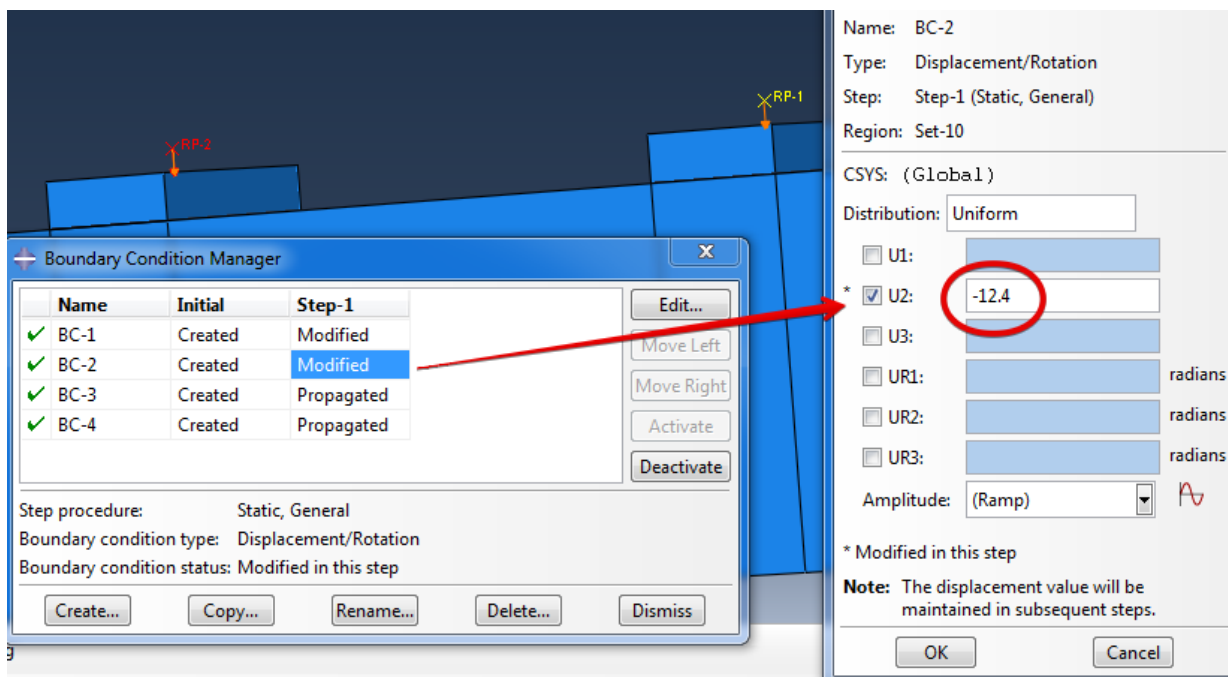


## ماژول Load

در این قسمت شرایط تکیه گاهی و بارگذاری تعریف می‌شود. شرایط تکیه گاهی در آزمایش خمش به این صورت است که یک تکیه گاه در حالت مفصل و تکیه گاه دیگر در حالت غلطکی قرار دارد. بنابراین شرایط مشابهی به ورق های تکیه گاهی متصل شده به تیر اعمال می‌شود.

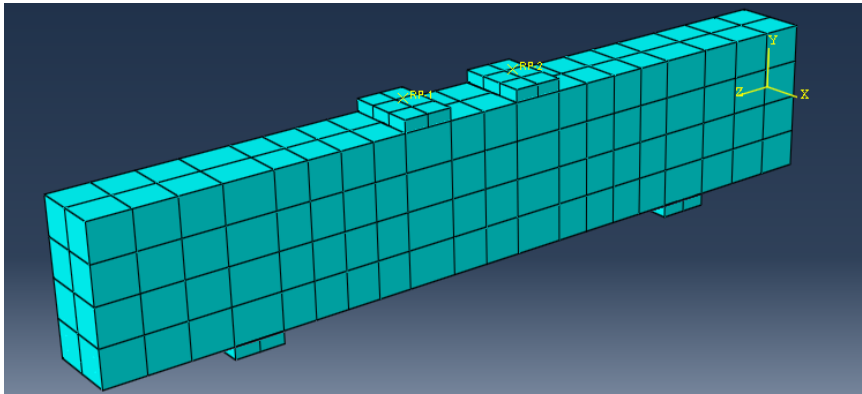


بارگذاری به صورت جا به جایی کنترل است بنابراین کافی است مقادیر جا به جایی مورد را در نقاط مرجع ساخته شده در مرحله قبل اعمال کنیم. در Initial Step گره جهت مورد نظر برای اعمال جا به جایی بسته می شود تا هیچ حرکتی رخ ندهد سپس در گام بعدی Step 1 مقدار جا به جایی مورد نظر وارد می شود تا درجه آزادی مورد نظر باز گردد. این جا به جایی در مدت زمان تعیین شده در ماژول Step به تیر اعمال می گردد.



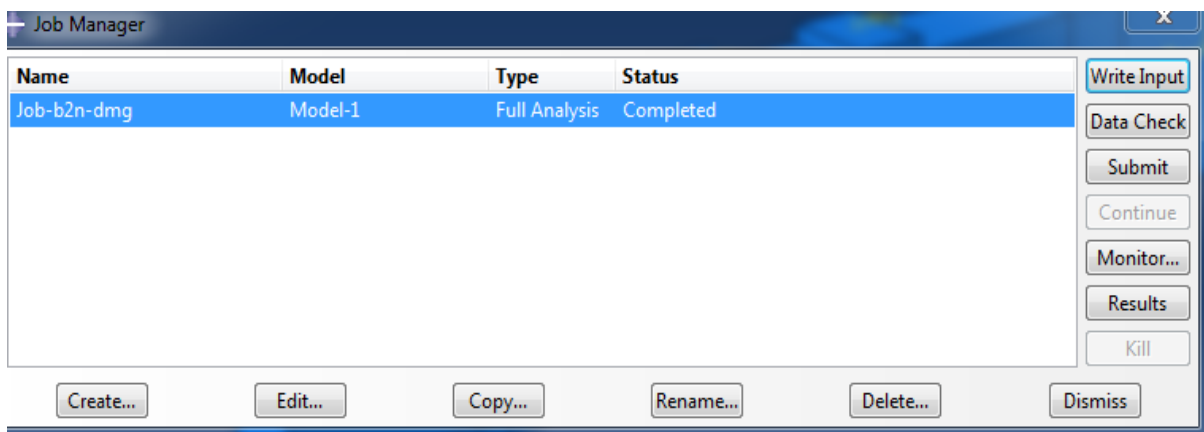
## ماژول Mesh

مش بندی مطابق با مباحث مطرح شده در قسمت المان بندی برای هر عضو به صورت مستقل انجام می-گردد.



## ماژول Job

در این قسمت می توان در صورت وجود خطا در تعاریف اولیه آن را از طریق Data check کنترل کرد. در صورت عدم وجود خطای اولیه در تعاریف شرایط مرزی و مشخصات مصالح و ... میتوان با ایجاد یک Job و کلیک روی گزینه Submit، تحلیل مدل را آغاز کرد. بسته به نوع مدل، مشخصات مصالح و اندازه مش بندی تحلیل ها می تواند از چند دقیقه تا چند ساعت طول بکشد.

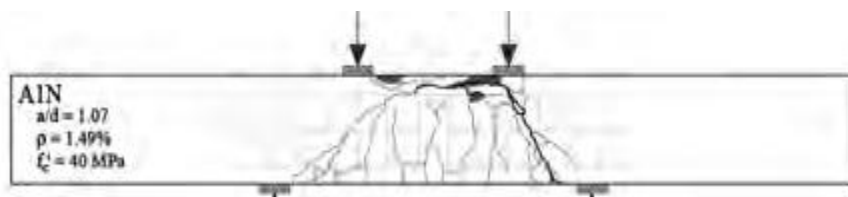
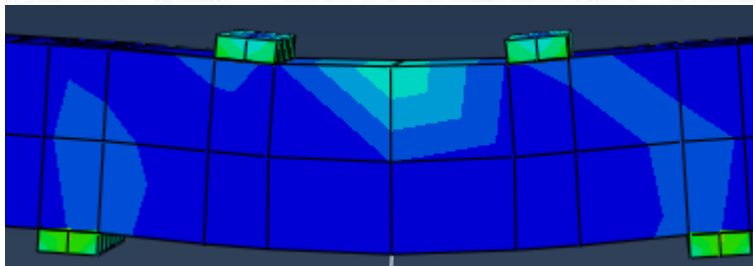
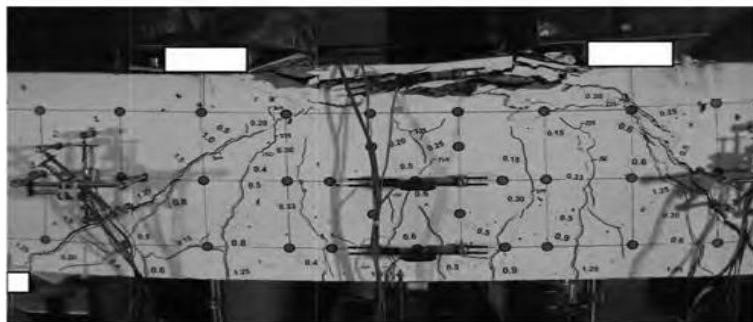
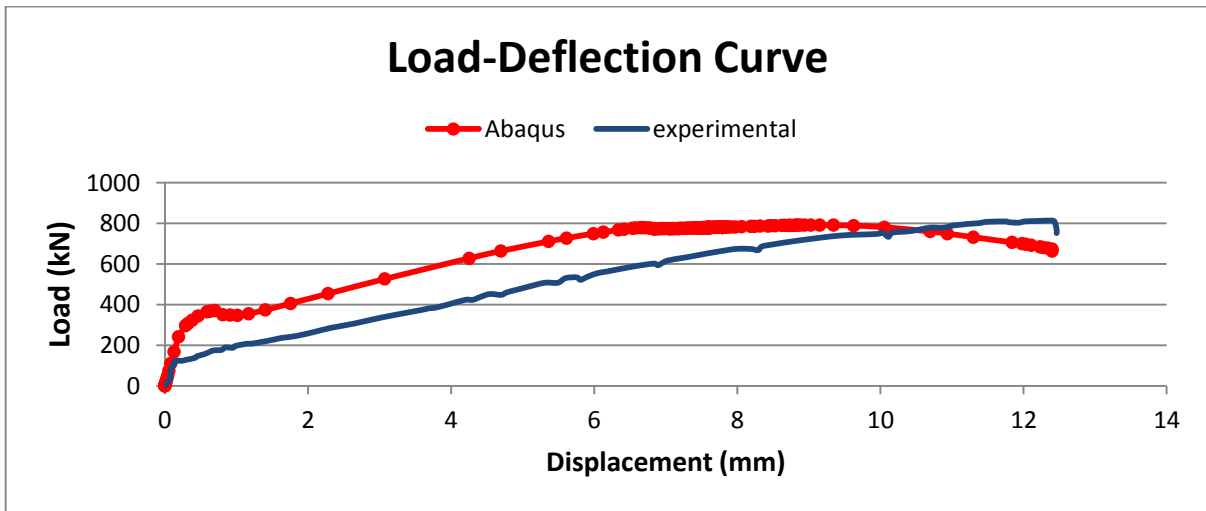


# صحت سنجی با مدل آزمایشگاهی

## تیر A1N

نام فایل آباکوس : job-A1N-noDMG-ConcRealModul

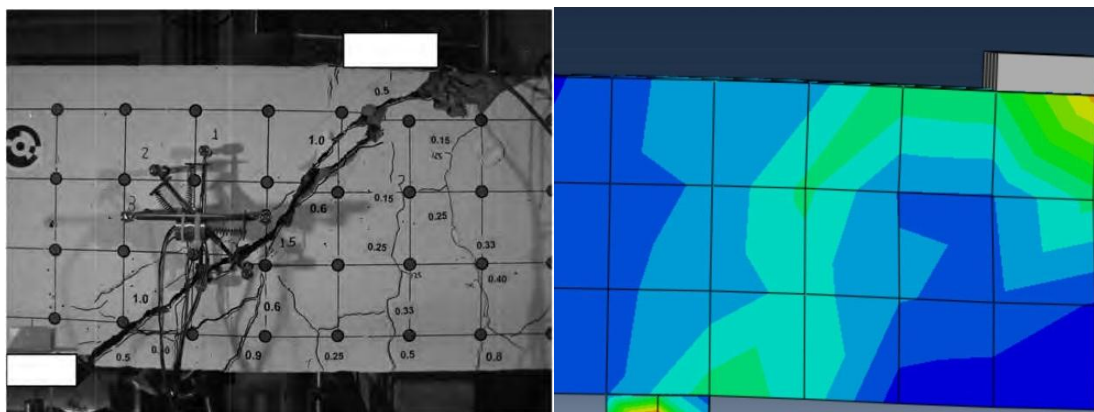
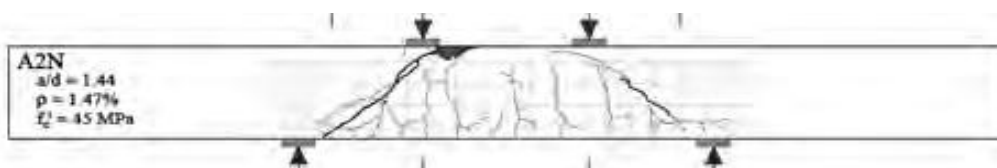
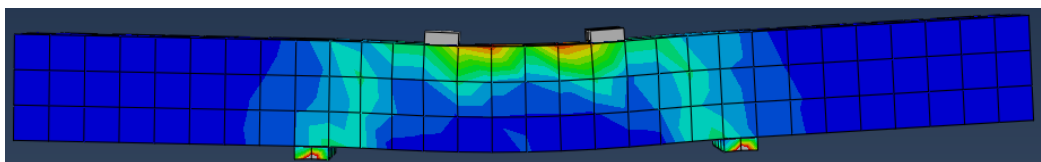
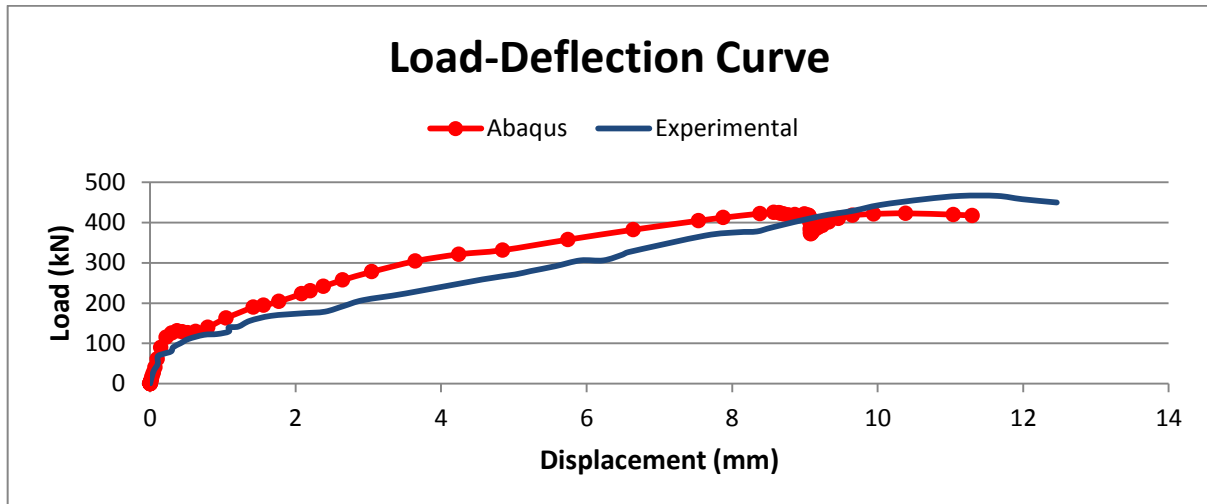
نمودار نیرو-تغییر مکان :



# تیر A2N

نام فایل آباکوس : job-noDMG-A2N

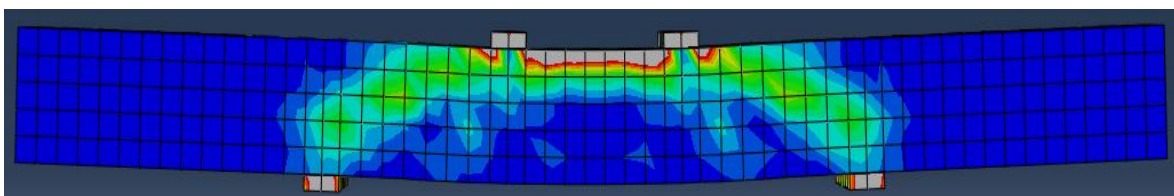
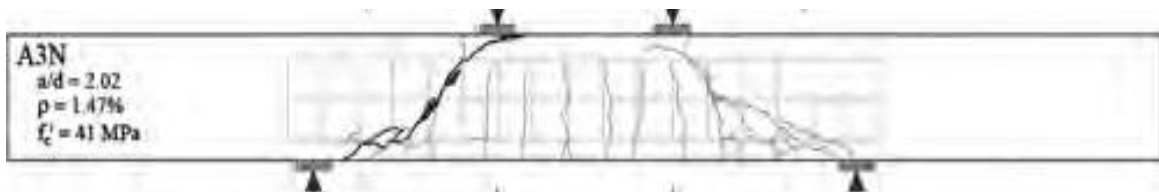
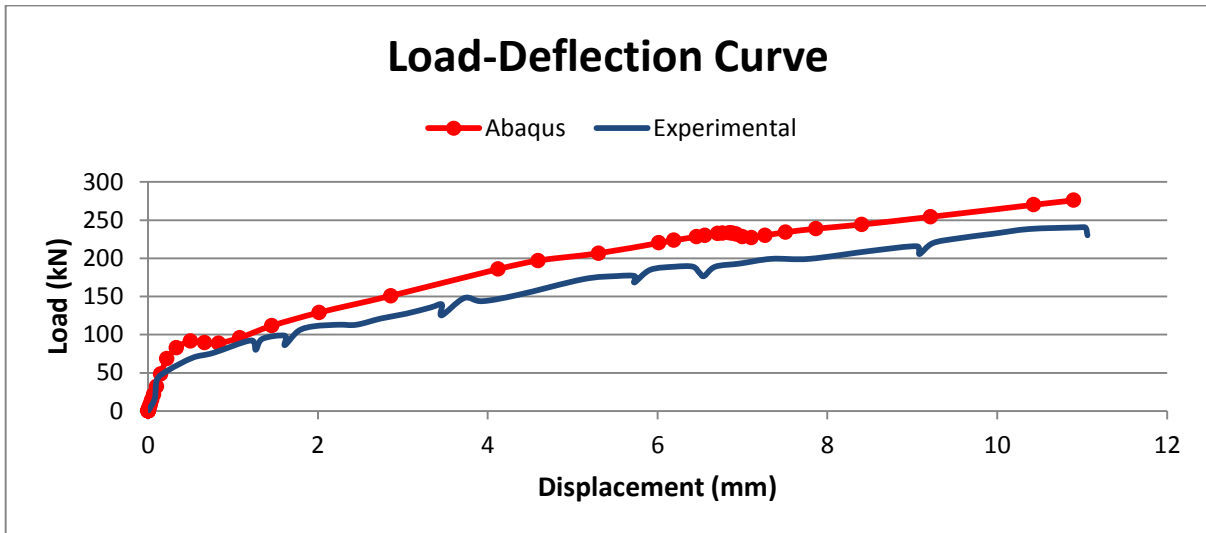
نمودار نیرو-تغییر مکان :



# تیر A3N

نام فایل آباکوس : job-A3N-noDMG

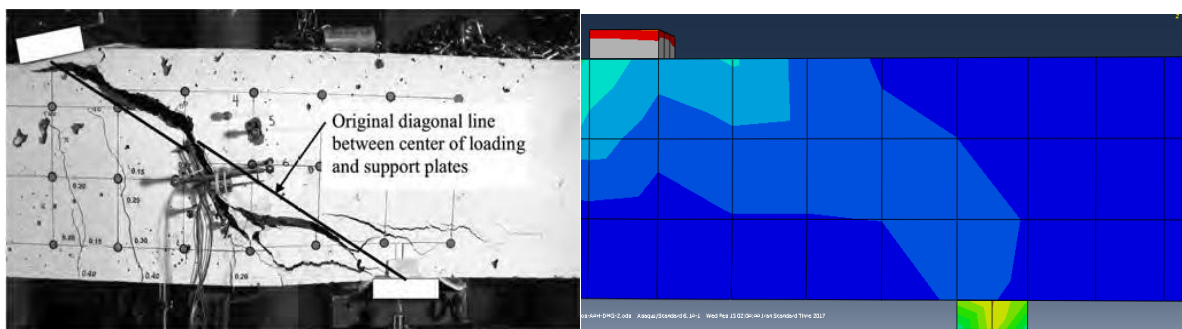
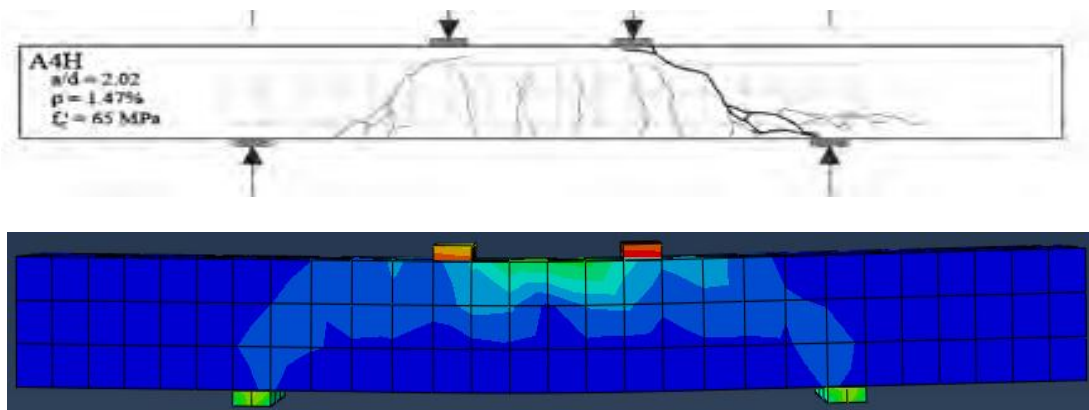
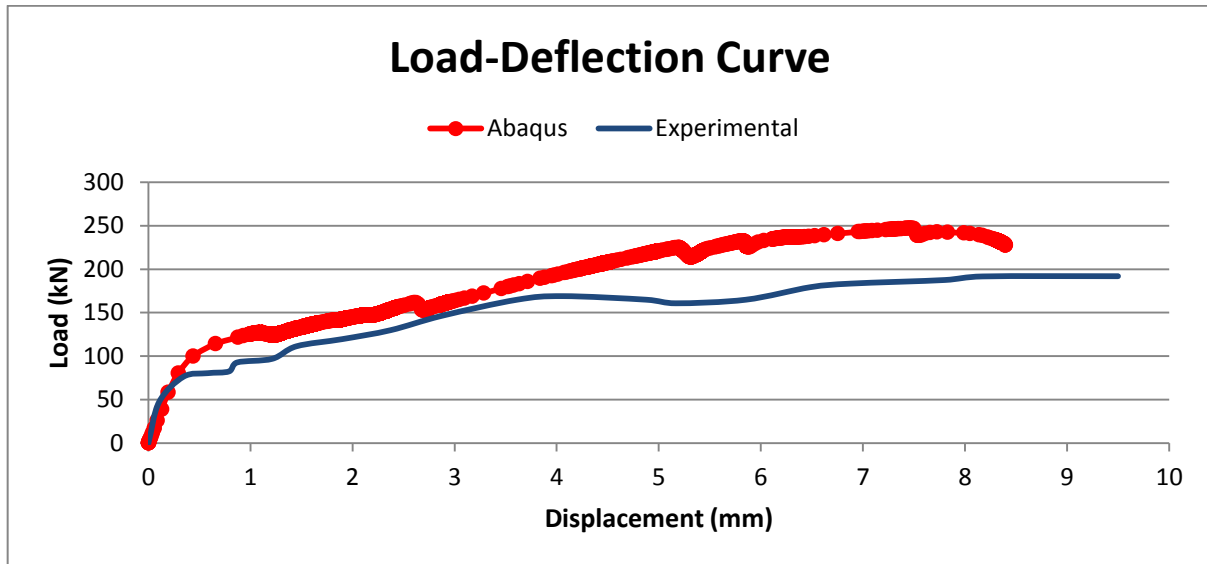
نمودار نیرو-تغییر مکان :



# تیر A4H

نام فایل آباکوس : DMG-3-meshriz

نمودار نیرو-تغییر مکان :

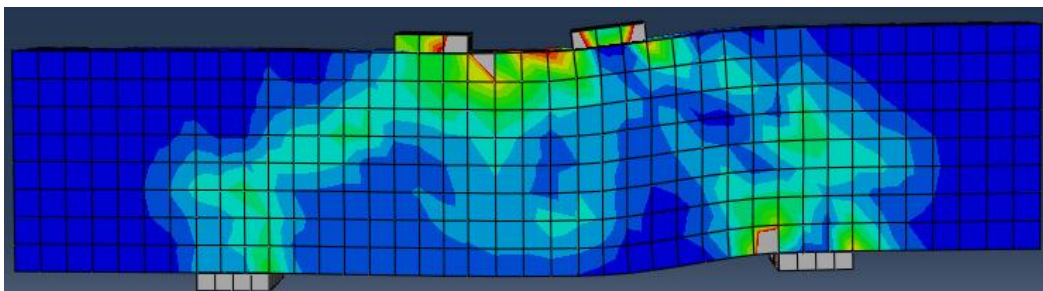
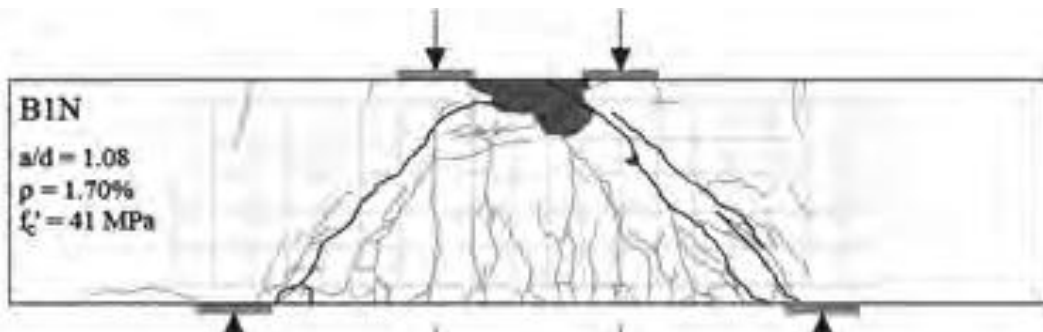
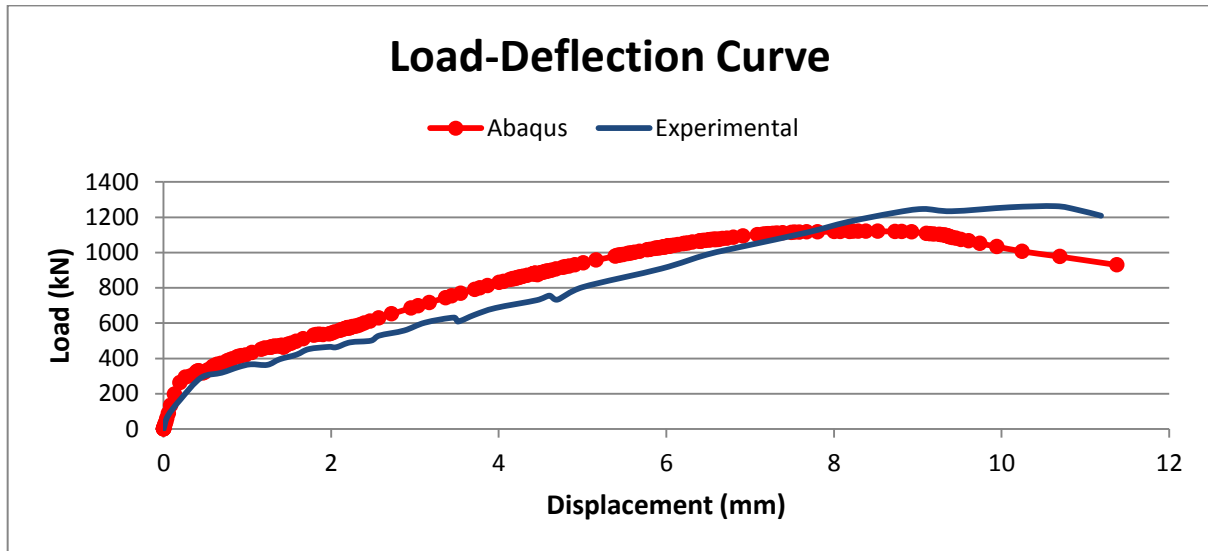




# تیر B1N

نام فایل آباکوس : B1N-noDMG

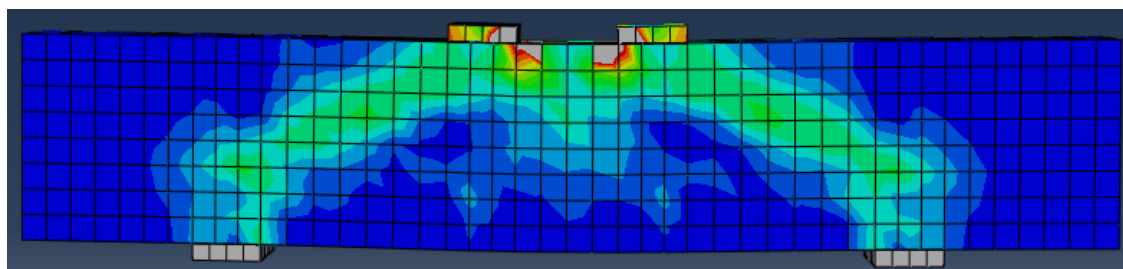
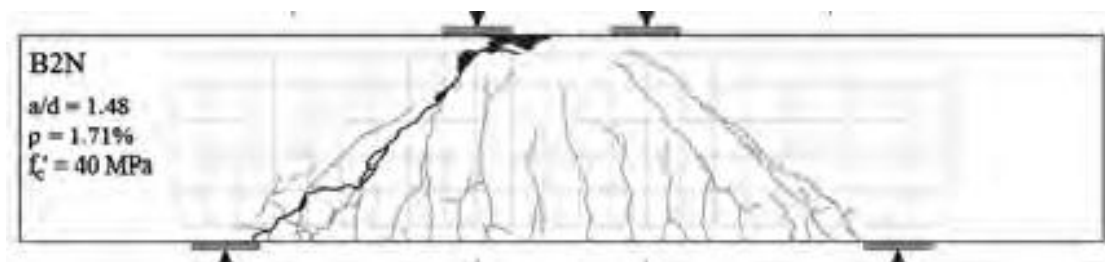
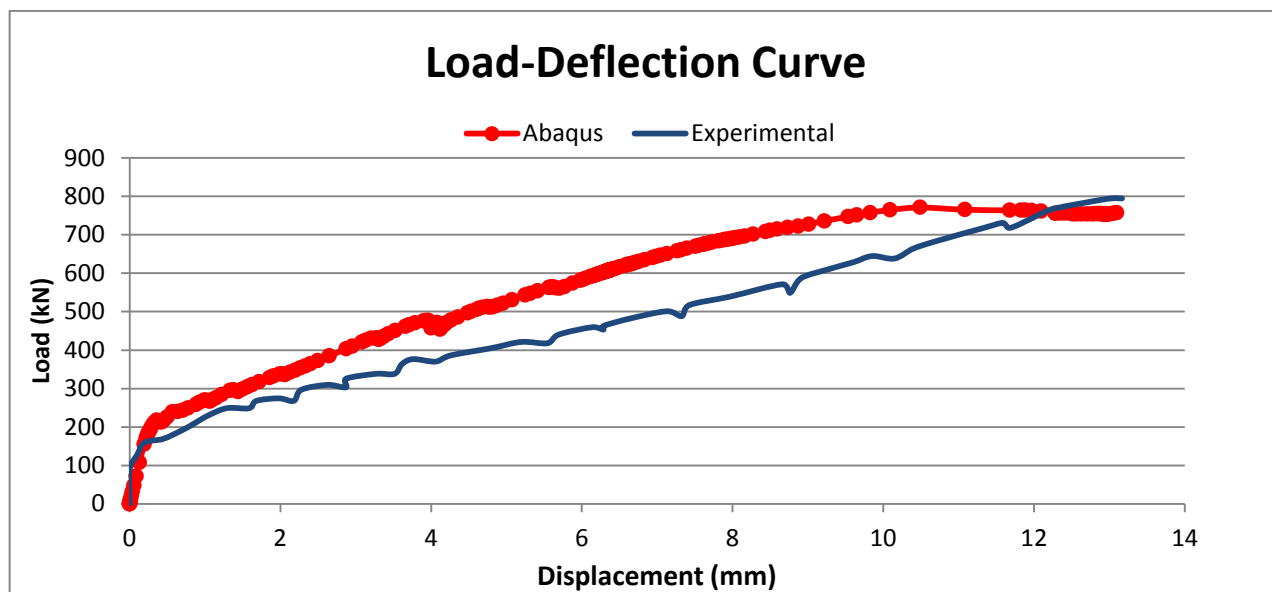
نمودار نیرو-تغییر مکان :



# تیر B2N

نام فایل آباکوس : B2N-noDMG-meshRiz

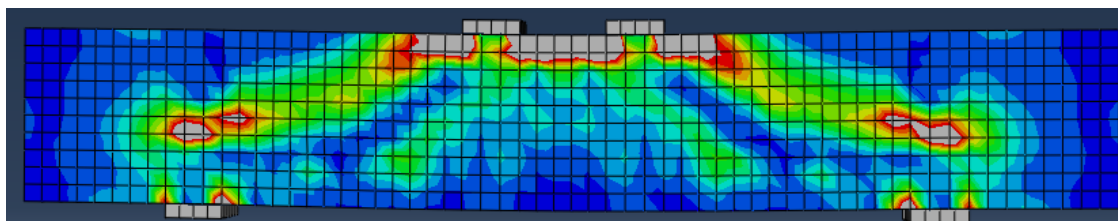
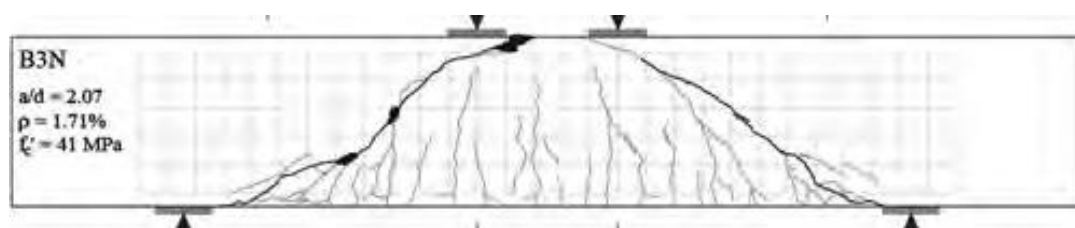
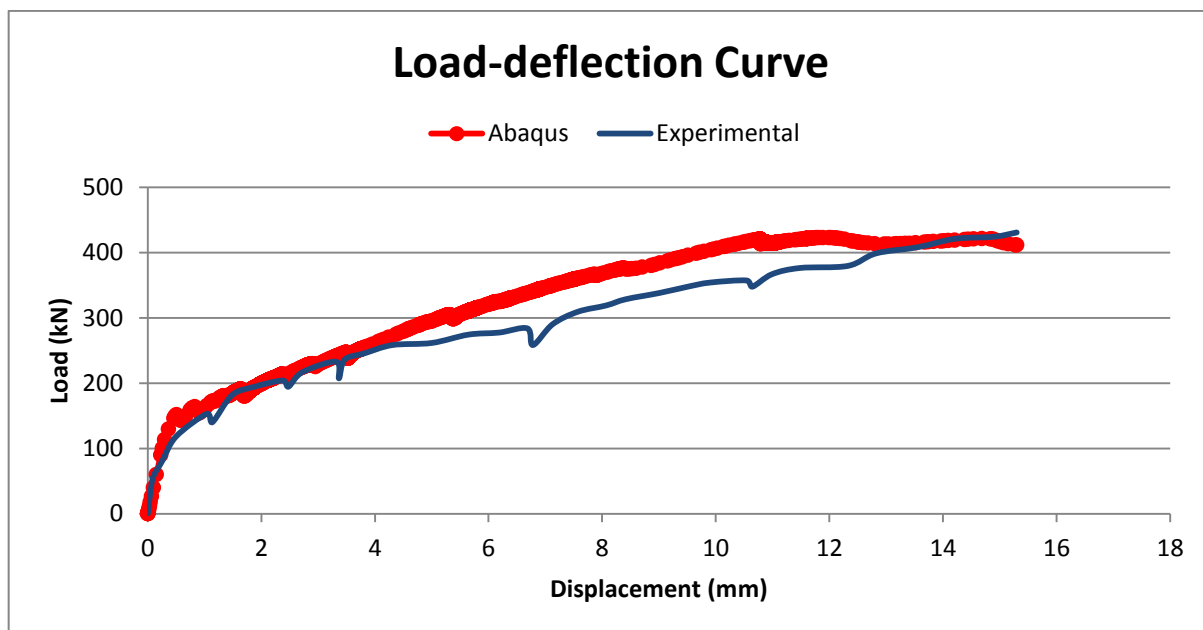
نمودار نیرو-تغییر مکان :



# تیر B3N

نام فایل آباکوس : B3N-dmg-noTension

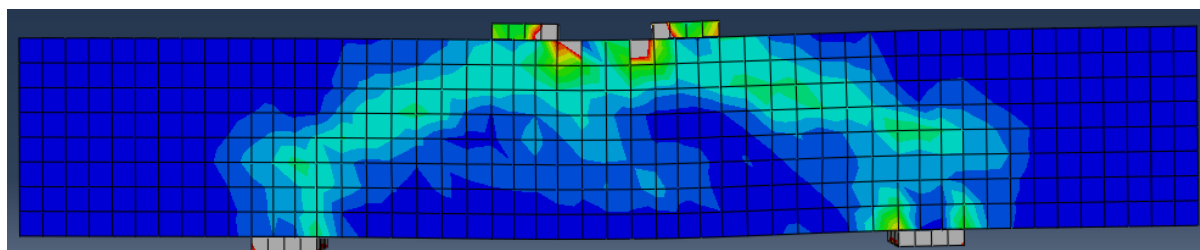
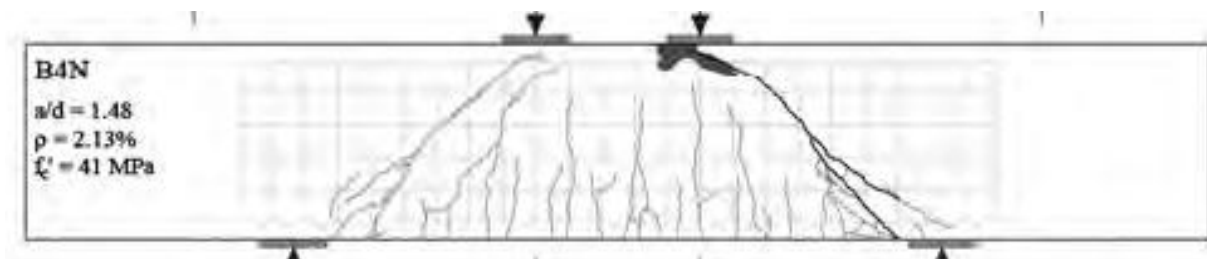
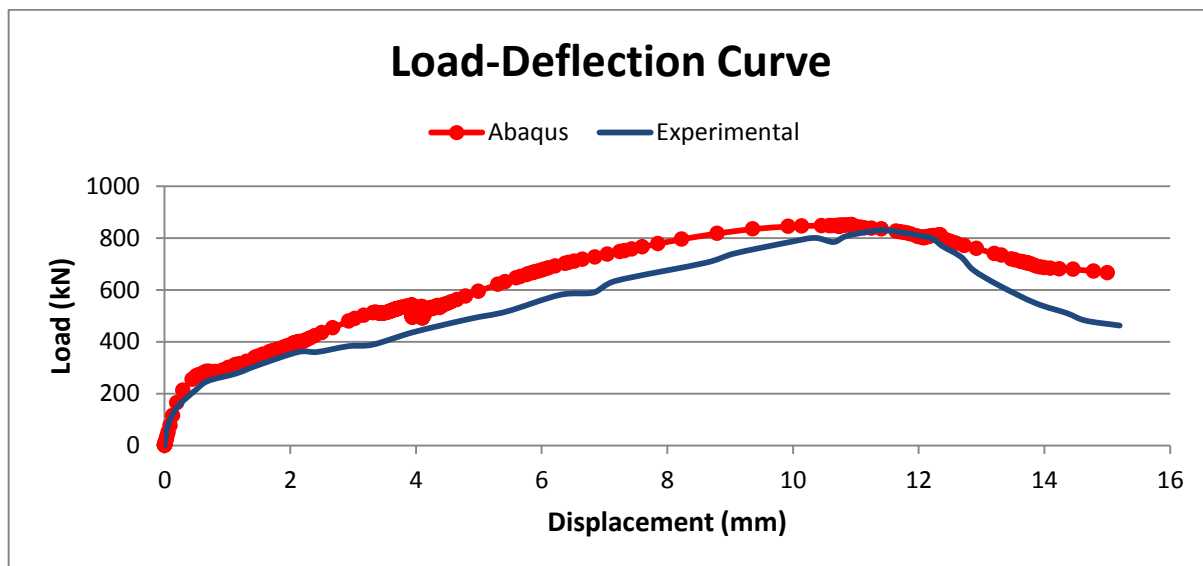
نمودار نیرو-تغییر مکان :



# B4N تیر

نام فایل آباکوس : job-B4n-noDmg

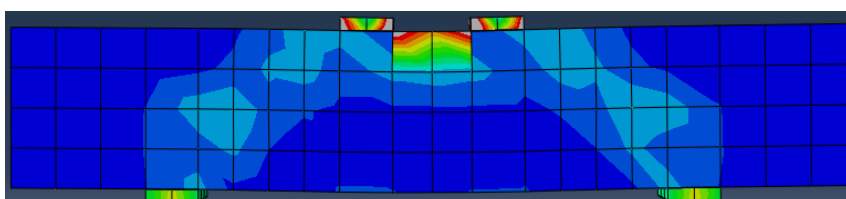
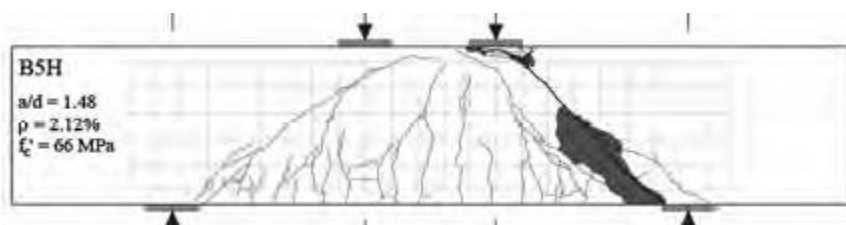
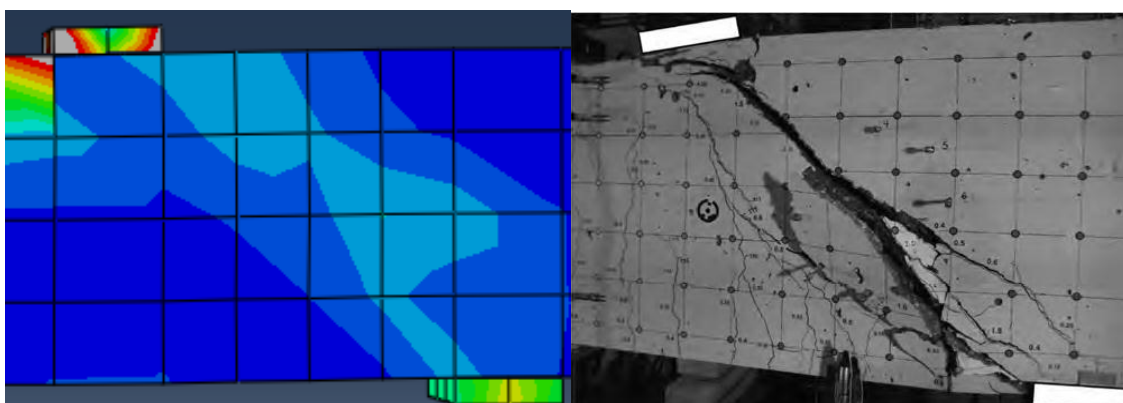
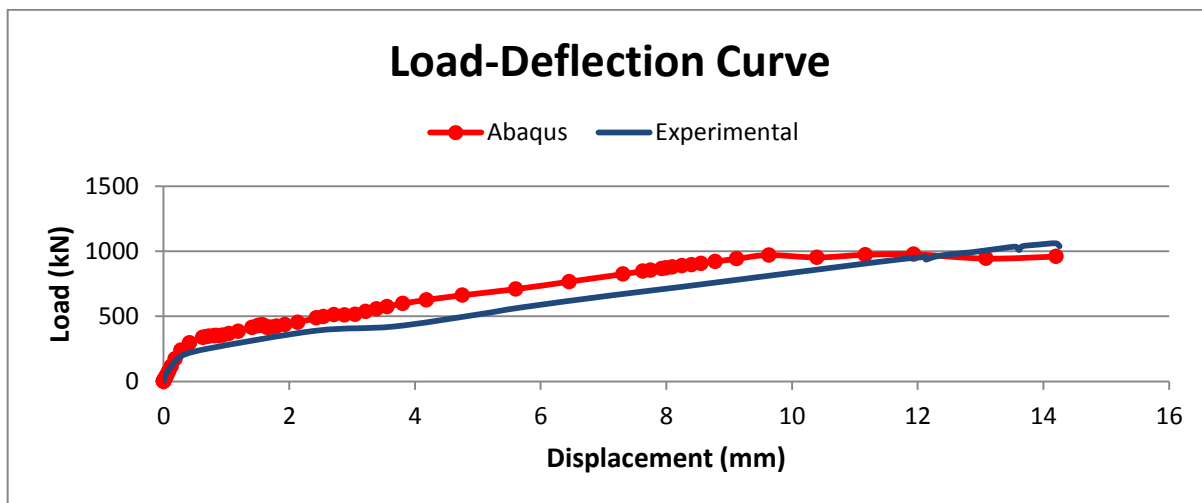
نمودار نیرو-تغییر مکان :



# تیر B5H

نام فایل آباکوس : b5h-nodmg2

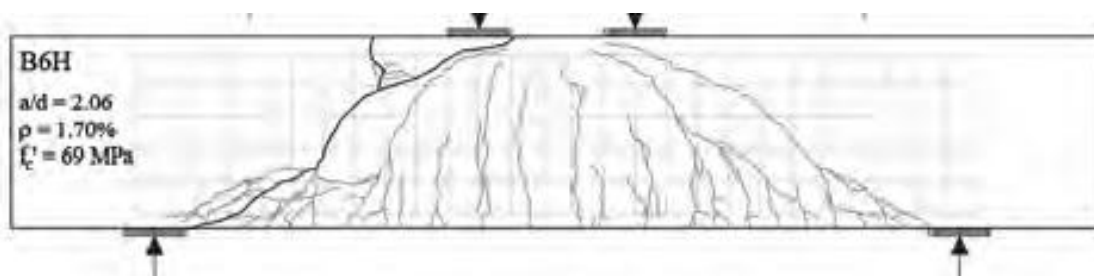
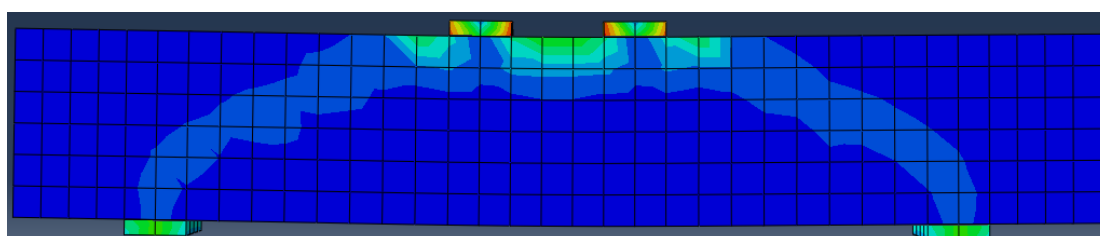
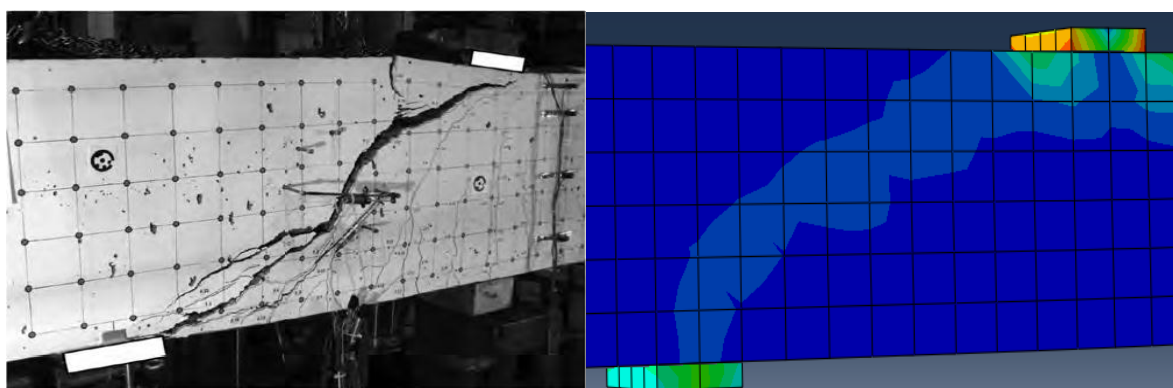
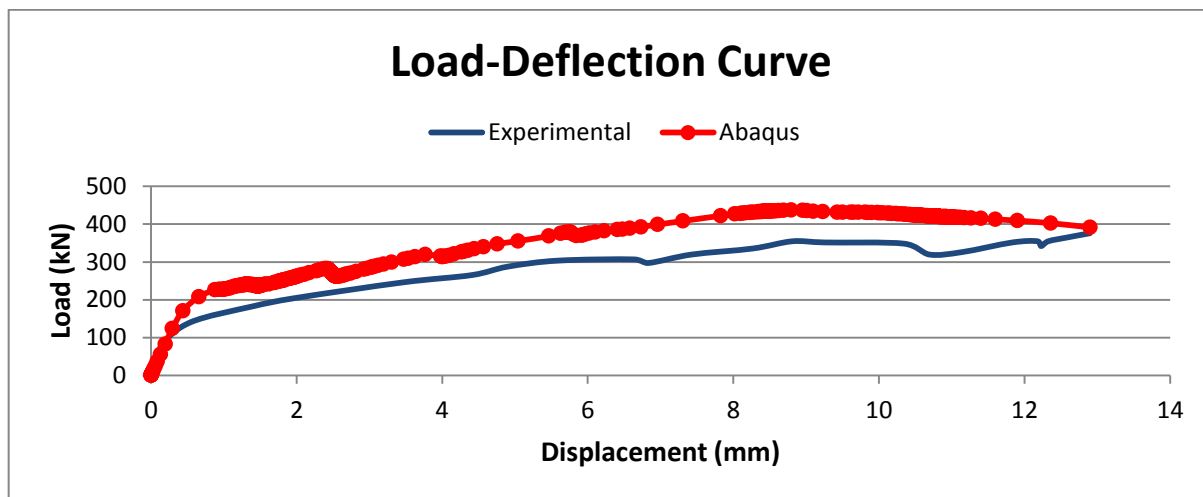
نمودار نیرو-تغییر مکان :



# تیر B6H

نام فایل آباکوس : b6h-dmg

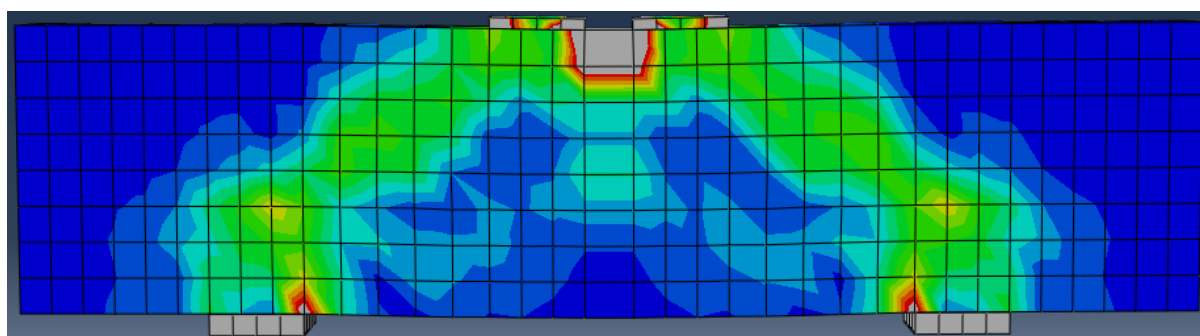
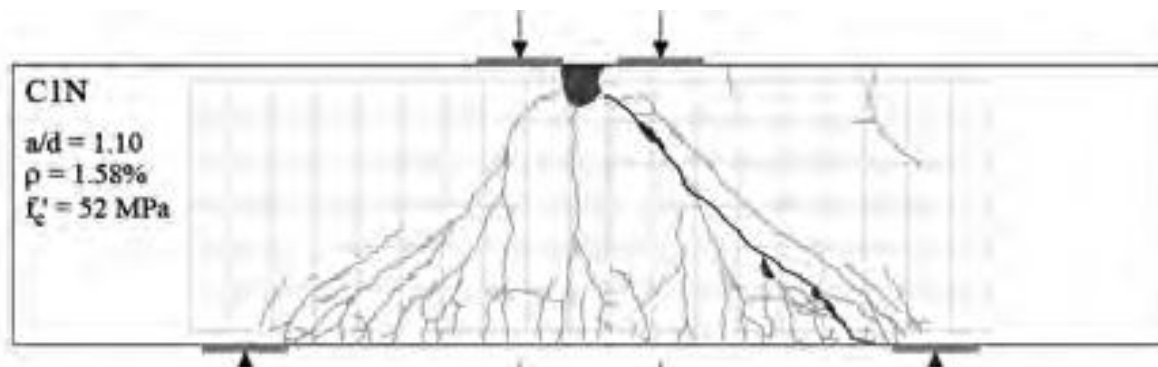
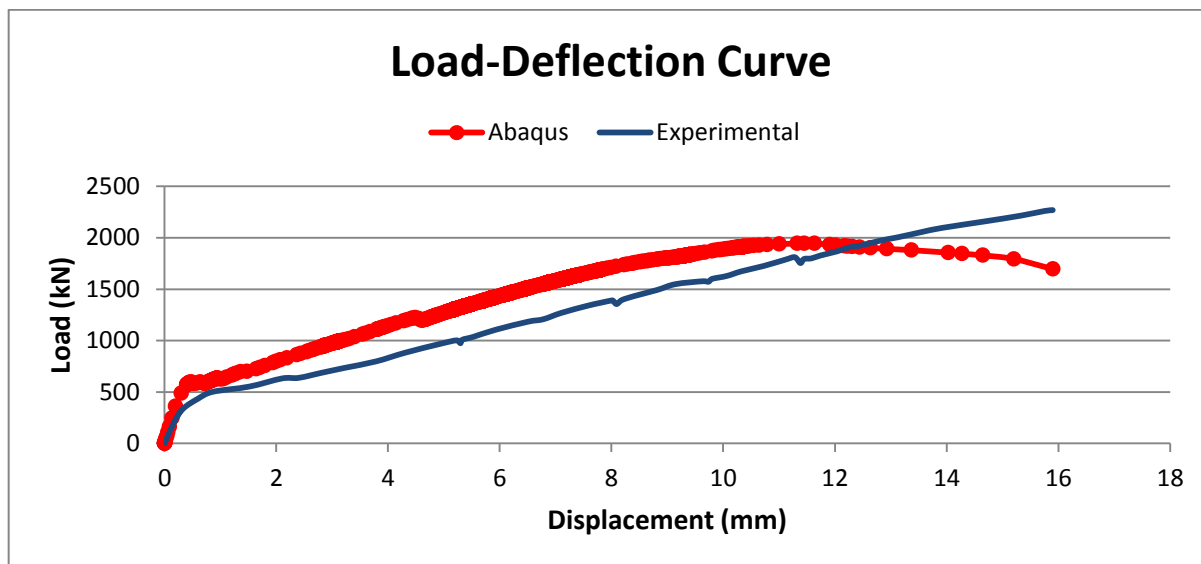
نمودار نیرو-تغییر مکان :



# تیر C1N

نام فایل آباکوس : C1N-nodmg

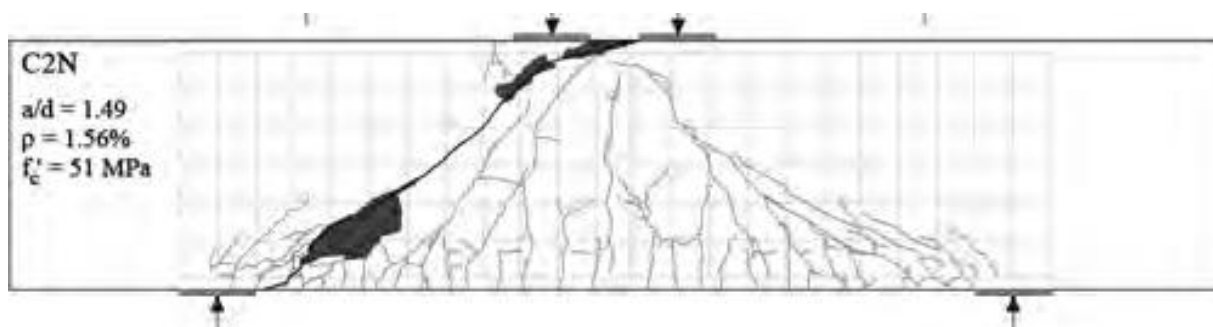
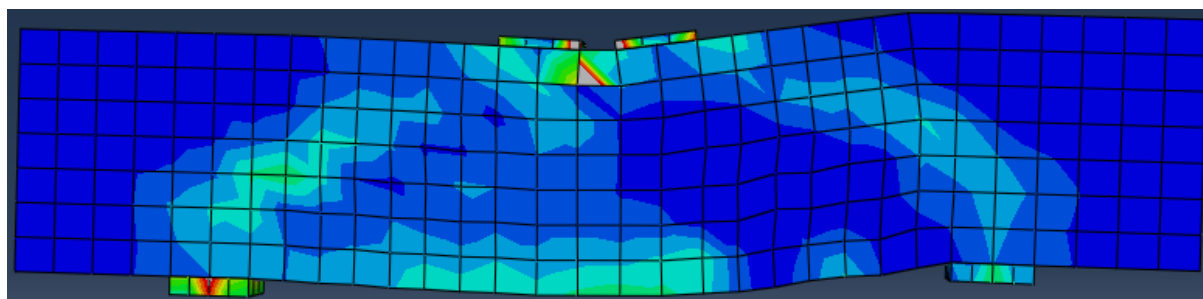
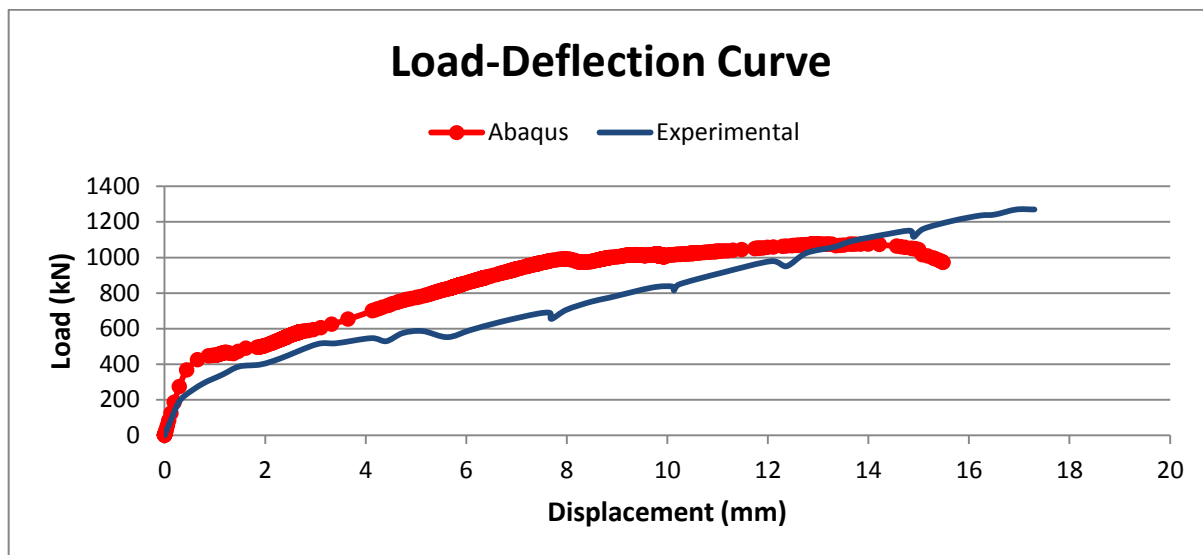
نمودار نیرو-تغییر مکان :



# تیر C2N

نام فایل آباکوس : C1N-nodmg

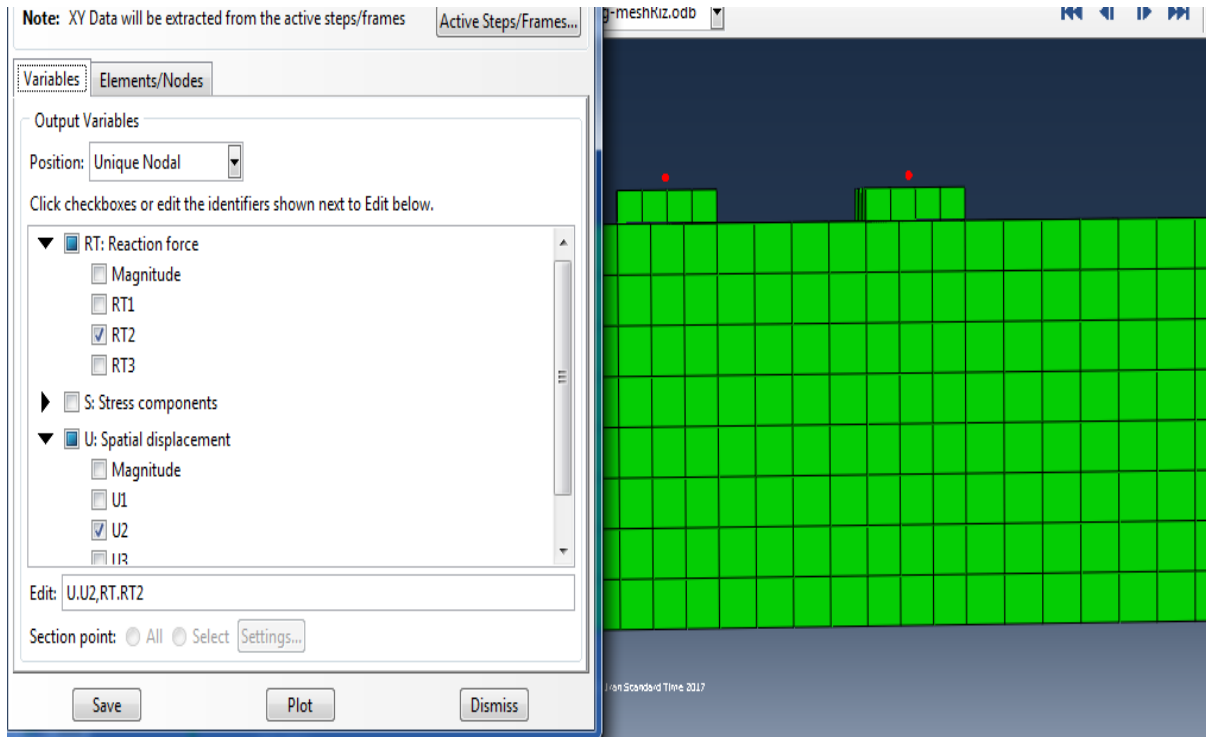
نمودار نیرو-تغییر مکان :





## کنترل حداکثر نیرو و جابه‌جایی

از آنجا که بارگذاری به صورت جابه‌جایی-کنترل است بنابراین نیروی وارده به تیر برابر با همان نیروهای عکس‌العمل است که می‌تواند به چند طریق بدست آید. از آنجا که قبلاً نقاط مرجع برای ورق‌های بارگذاری تعریف شده است و این نقاط مرجع به ورق‌ها کوپل شده‌اند، بنابراین به راحتی می‌توان با جمع نیروی عکس‌العمل در هر لحظه در دو نقطه مرجع، مقدار حداکثر نیرو وارده به تیر را (که همان نیروی عکس‌العمل وارده به ورق‌هاست) از پیک نمودار بدست آورد سپس این مقادیر با نتایج آزمایشگاهی مقایسه می‌شود و درصد خطا برای هر مدل تعیین می‌گردد. روند مشابهی را می‌توان برای تعیین حداکثر جابه‌جایی تا قبل از گسیختگی نهایی طی نمود.



Specimen	Experimental	Abaqus	Error
	$P_{max}$	$P_{max}$	
A1N	814	792.022375	0.0269995
A2N	471	424.9453438	0.0977806
A3N	243	275.926125	0.1354985
A4H	192	247.3629219	0.2883486
B1N	1273	1120.133	0.1200841
B2N	799	771.0669375	0.03496
B3N	431	423.02975	0.0184925
B4N	830	850.93125	0.0252184
B5H	1062	977.3520625	0.0797062
B6H	376	436.8165625	0.1617462
C1N	2269	1945.6125	0.1425242
C2N	1324	1074.80925	0.1882105

Specimen	Experimental	Abaqus	Error
	$\Delta_{max}$	$\Delta_{max}$	
A1N	12.462	12.4	0.004975
A2N	11.6436	11.30000019	0.02951
A3N	11.0627	10.89999962	0.014707
A4H	9.5	8.395813942	0.11623
B1N	11.3	11.37634468	0.006756
B2N	13.1683	13.10000038	0.005187
B3N	15.3	15.30000019	1.25E-08
B4N	15.198	15	0.013028
B5H	14.2574	14.19999981	0.004026
B6H	12.9	12.89999962	2.96E-08
C1N	15.9	15.89999962	2.4E-08
C2N	18.3	15.48683167	0.153725

<b>%Total Error for Displacement</b>	2.901201
<b>%Total Error for Load</b>	10.99641
<b>%Total Error for Abaqus Models</b>	6.948805

## نتیجه گیری

جهت صحت سنجی مدل المان محدود استفاده شده چندین مقایسه بین نمونه آزمایشگاهی و مدل عددی صورت گرفت. نمودار نیرو-جابجایی در وسط دهانه، حداکثر نیرو و جابجایی و نحوه توزیع تنش ها مورد بررسی قرار گرفت.

بررسی ها نشان می دهد در بیشتر موارد نمودار اجزای محدودی حاصل از تحلیل عددی در نرم افزار آباکوس دارای سختی بیشتری از نمودارهای حاصل از نتایج آزمایشگاهی است. موارد متعددی است که می تواند موجب سختی بیشتر در مدل های اجزای محدودی شود. مهمترین عامل ریزترکهای بتن در نمونه آزمایشگاهی هنگام عمل آوری و جمع شدگی ناشی از خشک شدن است که در بتن اتفاق می افتد. همچنین هنگام انتقال تیرهای بتنی با توجه به ابعاد بزرگ آن می توان انتظار داشت ریز ترکهایی هنگام حمل و نقل آن حاصل شود که همه این موارد موجب کاهش سختی و مدول الاستیسیته آزمون های آزمایشگاهی شود. این ریز ترکها در مدل های عددی در نظر گرفته نمی شود بنابراین می توان انتظار داشت تفاوت اندکی در رفتار حاصله از نمودارها مشاهده شود. با وجود ریز ترکها همچنان می توان مشاهده کرد که تطابق خوبی میان نتایج حاصل از تیرهای عمیق آزمایشگاهی و مدل های عددی آن وجود دارد

. توزیع تنش ها در تمام مدل های عددی مطابق با نتایج گسترش ترک در آزمون های آزمایشگاهی است. حداکثر نیرو و جابجایی مدل های عددی و آزمایشگاهی در تطابق خوبی با یکدیگر هستند و درصد خطای قابل قبولی وجود دارد. تشکیل دستک های فشاری خرابایی شکل که در تیرهای عمیق مرسوم است، به خوبی در مدل های عددی قابل مشاهده است.

همبستگی خوب میان نتایج آزمایشگاهی و عددی تایید کننده تئوری های استفاده شده برای تعریف رفتار چند خطی مصالح است [۳] [۴]، [۵]. در تیرهای عمیق مسلح شده با آرماتور GFRP توزیع کرنش برای بتن غیر خطی است که با فرضیه برنولی برای توزیع تنش-کرنش مطابقت ندارد. این نحوه توزیع کرنش ناشی از تغییر شکلهای برشی است که در تیرهای عمیق چشمگیر است. از آنجایی که توزیع کرنش غیر خطی در رفتار تیرهای عمیق دارای آرماتورهای GFRP غالب است، بنابراین تحلیل به روش اجزای محدود یک روش مناسب برای تحلیل و طراحی چنین تیرهایی است.

- [1] M. F. Andermatt and A. S. Lubell, “Behavior of Concrete Deep Beams Reinforced with Internal Fiber-Reinforced Polymer—Experimental Study,” *ACI Struct. J.*, vol. 110, no. 4, pp. 585–594, 2013.
- [2] R. Malm, “Predicting shear type crack initiation and growth in concrete with non-linear finite element method.,” PhD thesis, Department of Civil and Architectural engineering. Royal Institute of Technology (KTH) Stockholm, 2009.
- [3] “Identification of parameters of concrete damage plasticity constitutive model.” [Online]. Available: [https://www.researchgate.net/publication/228525599\\_Identification\\_of\\_parameters\\_of\\_concrete\\_damage\\_plasticity\\_constitutive\\_model](https://www.researchgate.net/publication/228525599_Identification_of_parameters_of_concrete_damage_plasticity_constitutive_model). [Accessed: 26-Feb-2017].
- [4] S. Popovics, “A numerical approach to the complete stress-strain curve of concrete,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 3, no. 5, pp. 583–599, Sep. 1973.
- [5] World Conference on Earthquake Engineering, International Association for Earthquake Engineering, and Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica, Eds., *Eleventh World Conference on Earthquake Engineering: Acapulco, Mexico, June 23 - 28, 1996 ; 11 WCEE*. Oxford: Pergamon, 1996.
- [6] T. H. Almusallam, H. M. Elsanadedy, Y. A. Al-Salloum, and S. H. Alsayed, “Experimental and numerical investigation for the flexural strengthening of RC beams using near-surface mounted steel or GFRP bars,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 40, pp. 145–161, Mar. 2013.