

ارزیابی عملکرد خمشی تیرهای فولادی I شکل پیش تنیده شده با تاندونهای میلگردی نامتصل به روش آنالیز عددی

افشین یادگاری*

مریی، گروه عمران، موسسه آموزش عالی صنعتی مراغه، مراغه، ایران،

محمدعلی لطفالهی یقین

استاد، دانشکده عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

رسول خدایاری

وزارت راه و شهرسازی، اداره کل راهداری و حمل و نقل جاده‌ای، استان آذربایجان شرقی، تبریز، ایران

Yadegari_af@yahoo.com

تاریخ دریافت: ۹۵/۰۸/۲۰ تاریخ پذیرش نهایی: ۹۵/۱۲/۰۵

چکیده

هدف اساسی از بکارگیری تکنیک پیش‌تنیدگی در سازه‌های فولادی، کاهش وزن مقاطع بواسطه افزایش ظرفیت باربری آنها می‌باشد که نهایتاً منجر به تحقق مزایای فنی و اقتصادی در چنین سازه‌هایی می‌گردد. در این تحقیق، روش پیش‌تنیدگی بصورت پس کشیدگی تاندونهای میلگردی خارجی نصب شده در نمونه‌های متنوعی از تیرهای فولادی I شکل، جهت تعیین میزان افزایش مقاومت خمشی و بهبود ظرفیت باربری، توسط نرم‌افزار المان محدود ABAQUS مورد تحلیل و ارزیابی قرار می‌گیرد. با توجه به وجود نتایج آزمایشگاهی و مقایسه با نتایج تحلیل‌های نرم‌افزاری انجام یافته برای هر کدام از نمونه‌ها، تطابق مناسبی بین آنها مشاهده شده و با اعمال تکنیک پیش‌تنیدگی، عملکرد خمشی تیرهای فولادی در قالب شاخص‌هایی نظیر تنش، کرنش و خیز بال پایینی تیر در وسط دهانه، همگی به میزان قابل توجهی بهبود می‌یابند.

کلید واژگان: تاندون میلگردی، تکنیک پیش‌تنیدگی، رفتار خمشی، فاصله نگهدار، روش آنالیز عددی.

۱- مقدمه

فولادی پیش تنیده را پیشنهاد و خواص مکانیکی آن را مورد بررسی قرار دادند [۲]. در این مطالعه در حالیکه ورقهای فولادی پیش تنیده، تحت کشش الاستیک پیش تنیدگی مختلفی قرار گرفته اند توسط جوشکاری با گاز خنثی به پروفیل T شکل متصل می گردند و بدین ترتیب یک تیر فولادی پیش تنیده با مقطع هندسی I شکل را تشکیل می دهند.

در سال ۲۰۰۸، B. Belletti و A. Gasperi دو محقق ایتالیایی نیز، در تحقیقی مشترک با عنوان " رفتار تیرهای فولادی پیش تنیده " به بررسی عملکرد تیرهای فولادی با مقطع I شکل و پیش تنیده شده با تاندون های خمیده پرداختند. به اعتقاد ایشان تیرهای مذکور از انواع معمولی آنها با طول و ظرفیت باربری مشابه، سبکتر هستند لذا این جنبه باعث فراهم شدن مزایای اقتصادی و ارائه یک راه حل دائمی در بسیاری از حالت های عملی می گردد [۳].

سرانجام در سال ۲۰۰۹ دو محقق از کره جنوبی با اسامی Sunkyu Park و Taewan Kim اقدام به انتشار مقاله ای تحت عنوان " رفتار خمشی تیر فولادی I شکل پیش تنیده شده با تاندون های خارجی غیر چسبیده " نمودند [۴]. آنها در این تحقیق رفتار خمشی و اثرات تقویتی تیرهای فولادی I شکل توأم با تاندون های خارجی غیر چسبیده، که با استفاده از تکنیک پس کشیدگی خارجی، پیش تنیده می گردند را مورد مطالعه قرار دادند و سپس با ارائه راه حل های تئوریک و بررسی های آزمایشگاهی روی نمونه های متعدد به نتایج قابل توجهی دست یافتند.

در واقع تحقیق حاضر نیز در راستای همین مطالعه آزمایشگاهی اخیر می باشد که نمونه های ارائه شده را مجدداً بصورت تحلیلی و به روش المان محدود مورد بررسی قرار داده و به مقایسه عددی نتایج بدست آمده از دو نوع بررسی می پردازد. از اینرو در ادامه با توجه اهمیت موضوع به تفصیل، به بررسی و تشریح جزئیات تحقیق اخیر پرداخته می شود.

۴- بررسی آزمایشگاهی

در این بررسی شش تیر فولادی I شکل بعنوان نمونه تهیه و تحت بارهای مختلف اعمال شده آزمایش گردیدند. میلگردها نیز بعنوان تاندون، جهت پیش تنیده ساختن و ارزیابی اثرات تقویتی در حالت های مختلف بکار گرفته می شوند. نیروی پیش تنیدگی معادل ۹۸ کیلونیوتن به هر کدام از تاندون ها اعمال می گردد. یک تیر فولادی نیز بدون پیش تنیدگی بعنوان تیر کنترل در نظر گرفته شده و با سایر تیرهای پیش تنیده خارجی به منظور مشاهده بهبود در رفتار خمشی، مقایسه می گردد. علاوه بر آنها اثرات فاصله نگهدار نیز در رفتار خمشی تیرها مورد آزمایش قرار می گیرد.

۴-۱- ساخت نمونه های آزمایشگاهی

تیرهای فولادی با ارتفاع ۳۰۰، عرض بال ۳۰۰، ضخامت جان ۱۰ و ضخامت بال ۱۵ میلیمتر، تهیه شدند. طول دهانه برای تمامی تیرها ۴ متر در نظر گرفته شده است. تاندونهای میلگردی بکار رفته در

ایده بکارگیری تکنولوژی پیش تنیدگی جهت مقاوم سازی سازه ها در چند دهه اخیر مورد توجه مهندسين طراح و محاسب قرار گرفته است. اعمال این فن آوری در سازه های فولادی، دارای عمر طولانی نبوده و در سالهای اخیر با توسعه صنعت فولاد در زمینه های نظیر احداث ساختمان، پل سازی و ... بطور جدی مطرح شده است. فن آوری پیش تنیدگی بعنوان روشی آسان و کاربردی، برای مقاوم سازی سازه های فولادی در دست طراحی و نیز جهت تقویت سازه های احداث شده، قابل اجرا می باشد [۱]. از اینرو مطالعه اخیر با ارائه و تحلیل مدل های متنوعی به ارزیابی رفتار خمشی تیرهای فولادی ساختمانی تقویت شده به روش پیش تنیدگی پرداخته و نقش عوامل مؤثر جهت بهبود این رفتار را آشکار می سازد.

۲- روش تحقیق

برای دستیابی به هدف اصلی در این تحقیق که بررسی عملکرد و بهبود رفتار خمشی تیر های فولادی I شکل پیش تنیده شده با تاندون های میلگردی خارجی می باشد، لازم بود نمونه هایی جهت بررسی به روش های آزمایشگاهی و تحلیلی تهیه گردند. بدین منظور شش تیر فولادی بعنوان مدل های مطرح شده در تحقیقات قبلی، که به اشکال مختلف پیش تنیده شده و تحت بارهای متنوع خارجی قرار گرفته بودند و نیز نتایج آزمایشگاهی مربوط به آنها ارائه شده بود، جهت مدلسازی و تحلیل با نرم افزار المان محدود ABAQUS انتخاب گردیدند.

پس از تحلیل نمونه ها، مقادیر بدست آمده مربوط به تنش، کرنش و تغییر مکان (خیز) در وسط دهانه تیرهای مورد نظر، با داده های آزمایشگاهی مورد مقایسه قرار گرفتند و تطابق مناسبی بین این دو روش مشاهده گردید. ضمناً نقش هر کدام از متغیرهای مؤثر در این تحقیق شامل تعداد تاندون ها، مقدار نیروی پیش تنیدگی اعمالی و وجود فاصله نگهدارها، در بهبود عملکرد خمشی تیرهای فولادی پیش تنیده مورد بررسی قرار گرفت.

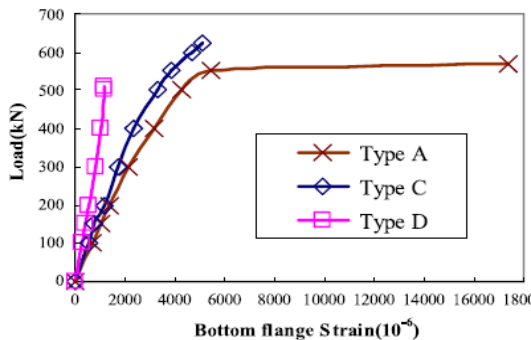
۳- مروری بر تحقیقات گذشته

طی دهه گذشته تحقیقات و مطالعات متعددی بطور خاص در زمینه پیش تنیدگی سازه های فولادی در دانشگاه ها، و مراکز تحقیقاتی کشورهای مختلف دنیا، توسط محققان صورت گرفته و نتایج بدست آمده در قالب مقالاتی معتبر منتشر گردیده است که به چند نمونه از آنها اشاره می گردد:

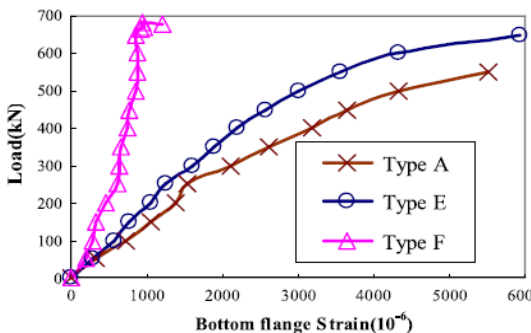
در سال ۲۰۰۶ دو متالوژیست از کشور ترکیه به نامهای A. Ozer و Y. Ozcatlbas در پژوهشی مشترک تحت عنوان " تحقیق در زمینه ساخت و بررسی خواص مکانیکی تیر فولادی I شکل پیش تنیده شده بصورت داخلی "، ساخت یک تیر فولادی I شکل بصورت ترکیبی از یک پروفیل T شکل و یک ورق

الف- رفتار بال پائینی در وسط دهانه :

کرنش بال پائینی در وسط دهانه نمونه‌ها، به محض تغییر در نیروهای پیش‌تنیدگی اعمالی و نصب فاصله نگهدار، اندازه‌گیری شده و نمودارهای بار- کرنش مربوطه به شرح شکل ۲- (a) و (b) ترسیم می‌گردند.



(a) Load-strain relation for 1 bar prestressing.



(b) Load-strain relation for 2 bar prestressing.

شکل ۲- رابطه بار- کرنش در بال پائینی نمونه‌ها

ب- رفتار تاندون‌های میلگردی در نمونه‌ها :

کرنش تاندون‌های میلگردی توسط کرنش سنج‌های فولادی نصب شده، به محض اعمال بارگذاری خارجی بر روی نمونه‌ها اندازه‌گیری می‌شود. نمودارهای شکل ۳- (a) و (b) ارتباط میان کرنش تاندون و بارگذاری در نمونه‌های توأم با تاندون میلگردی را نشان می‌دهد.

این آزمایش نیز دارای مقطعی به قطر ۲۵ میلیمتر می‌باشد. مشخصات مصالح مصرفی در جدول ۱ درج گردیده است.

جدول ۱- مشخصات مصالح مصرفی در نمونه‌های آزمایشگاهی

| نوع المان | سطح مقطع (m ²) | ممان اینرسی (m ⁴) | مدول الاستیسته (GPa) |
|----------------|----------------------------|-------------------------------|----------------------|
| تیر فولادی | 0.01198 | 2.04*10 ⁻² | 200 |
| تاندون میلگردی | 0.000491 | 1.917*10 ⁻⁶ | 200 |

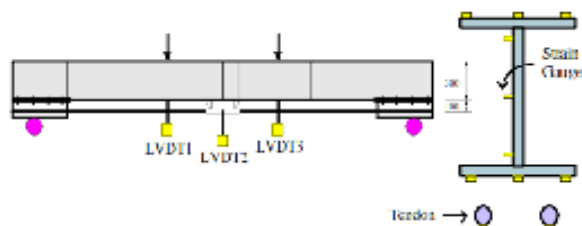
تمامی نمونه‌ها (به استثنای نمونه تیپ A که بعنوان تیر کنترل در نظر گرفته شده است) شامل تیرهایی هستند که با تاندون میلگردی پیش‌تنیده شدند، بطوریکه برخی با یک تاندون یا بدون فاصله نگهدار و مابقی آنها دارای دو تاندون توأم با فاصله نگهدار یا بدون آن می‌باشند. با اعمال نیروی پیش‌تنیدگی به مقدار ۹۸ کیلو نیوتن به هر کدام از تاندون‌ها، تیرهای توأم با یک تاندون با همان نیروی ۹۸ کیلو نیوتن پیش‌تنیده شدند، در حالیکه تیرهای دارای دو تاندون با نیروی ۱۹۶ کیلو نیوتن پیش‌تنیده شدند. مشخصات تیرهای مورد آزمایش در جدول ۲ نشان داده شده است.

جدول ۲- مشخصات تیرهای پیش‌تنیده شده با تاندونهای میلگردی

| نمونه‌ها | فرضیات پیش‌تنیدگی | | |
|----------|-------------------|--------------|-----------------------|
| | تعداد میلگرد | فاصله نگهدار | نیروی پیش‌تنیدگی (KN) |
| A | - | NO | - |
| B | 1 | NO | - |
| C | 1 | NO | 98 |
| D | 1 | YES | 98 |
| E | 2 | NO | 196 |
| F | 2 | YES | 196 |

۴-۲- ارزیابی نتایج آزمایشگاهی

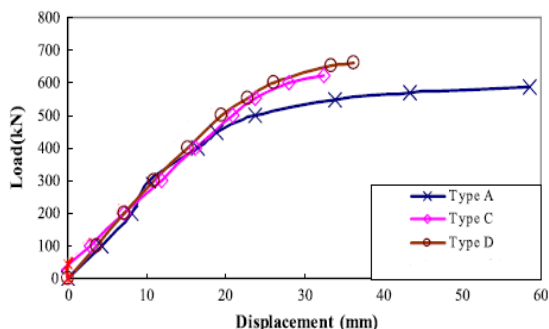
در این تحقیق رفتار خمشی تیرهای فولادی I شکل پیش‌تنیده شده بو سیله تاندون‌های خارجی، با نصب کرنش سنج‌ها و گیرندگان تغییرات جابجایی خطی (خیز سنج‌ها) و اندازه‌گیری کرنش تاندون و نیز کرنش و خیز بال پائین تیر در وسط دهانه تحت اعمال نیروهای پیش‌تنیدگی مورد بررسی قرار می‌گیرد.



شکل ۱- نصب کرنش سنج‌ها و خیز سنج‌ها در نمونه‌ها

ج- تحلیل رابطه بار- خیز در نمونه‌ها :

خیز کلی تیرهای فولادی پیش تنیده شده، بنحویکه در شکل ۴ نشان داده می‌شود، اندازه‌گیری و بصورت نمودار ترسیم می‌گردد.



Load-displacement relation for 98 kN prestressing force.

شکل ۴- رابطه بار- خیز در بال پائینی نمونه‌ها

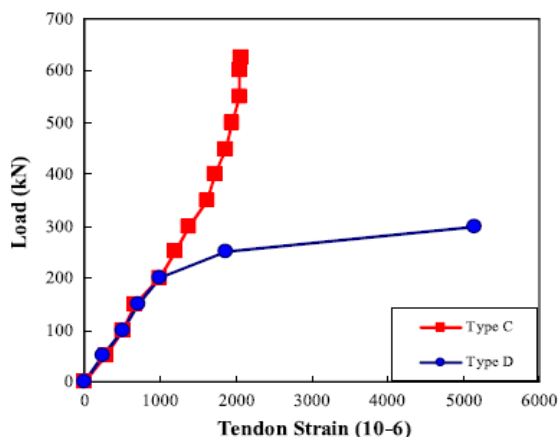
حال در ادامه پژوهش قبلی و با توجه به قابلیت دسترسی به نتایج آزمایشگاهی استخراج شده از آن، اقدام به مدلسازی و تحلیل نرم افزاری هر کدام از نمونه‌ها در تحقیق حاضر می‌نمائیم.

۵. تحلیل نرم‌افزاری

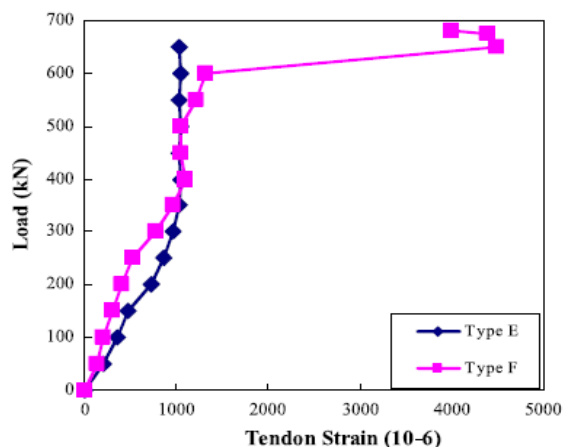
با پیشرفت روزافزون امکانات نرم‌افزاری و سخت‌افزاری در چند دهه اخیر، استفاده از نرم‌افزارهای امان محدود در حل مسائل مهندسی پیشرفت قابل توجهی پیدا کرده است. نرم‌افزار امان محدود ABAQUS، برای انجام انواع آنالیزهای دینامیکی غیرخطی و استاتیکی غیرخطی در حالت‌های دو بعدی و سه بعدی مورد استفاده بوده و می‌تواند خواص غیرخطی هندسی و غیرالاستیک بودن مصالح، (هر دو به طور همزمان) را منظور کند [۵].

۵-۱- مدلسازی نمونه‌ها

شش نمونه تیر فولادی پیش‌تنیده، به ترتیب مدلسازی می‌گردند. ابعاد تیرها و تاندون‌ها در تمام نمونه‌ها یکسان است ولی تعداد تاندون‌ها، نصب فاصله نگهدار و مقدار نیروی پیش‌تنیدگی اعمالی در آنها متفاوت خواهد بود (کلیه ابعاد در نمونه‌ها برحسب میلی‌متر منظور شده است). مدول‌های برنامه، اساس کار و گام‌های حل نرم‌افزار هستند و باید پشت سر هم و به ترتیب انجام شوند.



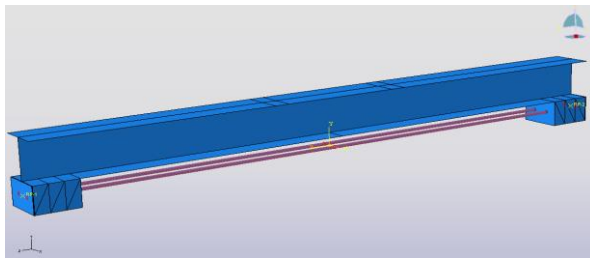
(a) Load-strain relation for 1 bar prestressing.



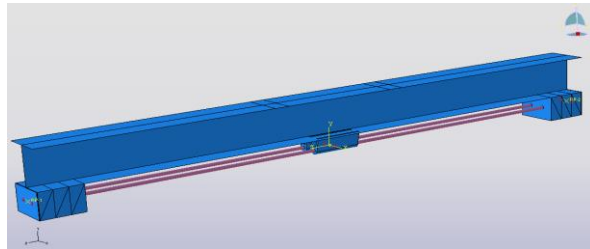
(b) Load-strain relation for 2 bar prestressing.

شکل ۳- رابطه بار- کرنش تاندون، در نمونه‌های توأم با تاندون‌های میلگردی

اشکال ۳- (a) و (b) به ترتیب شامل نمونه‌های پیش‌تنیده شده توأم با یک و دو تاندون می‌باشند. در شکل (a)، تاندون تکی در نمونه تیپ D بعلاوه ظرفیت کمتر، زودتر از تیر فولادی تسلیم می‌گردد چون که فاصله نگهدار در حالت تاندون تکی، توانایی تغییر خروج از مرکزیت را ندارد. بنابراین عملکرد دو تاندون قابل اطمینان‌تر است، زیرا فاصله نگهدار نقش خود را بطور مؤثر و با تطابق بهتری جهت تغییر خروج از مرکزیت ایفاء می‌نماید، همانطور که در نمودارهای شکل (b) نشان داده می‌شود. در حالت کلی اعمال میزان پیش‌تنیدگی اختصاص یافته زمانی که فاصله نگهدار بکار برده می‌شود، قابل توجه است.



نمونه تیپ E (با دو تاندون میلگردی، با پیش‌تنیدگی ۱۹۶KKN)



نمونه تیپ F (با دو تاندون میلگردی، با فاصله نگهدار، با پیش

تنیدگی ۱۹۶KKN)

شکل ۵- نمونه‌های مدلسازی شده از تیرهای پیش‌تنیده

۲-۵- آنالیز مدلها به روش استاتیکی غیرخطی (Pushover)

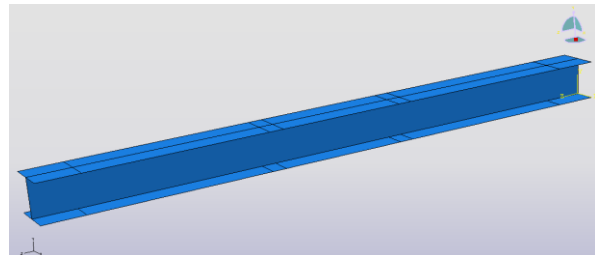
آنالیز پوش‌آور معمولی یکی از روش‌هایی است که برای ارزیابی ظرفیت سازه مورد استفاده قرار می‌گیرد. بطوریکه نشانگر ویژگی پاسخ دینامیکی سازه با یک بارگذاری ثابت است که این بارگذاری تابع تغییر شکل‌های دینامیکی سازه حین تحلیل نمی‌باشد. در این روند برنامه قادر به در نظر گرفتن بارهای ثقیلی و جانبی بطور همزمان می‌باشد. این روش جهت انجام تحلیل روی نمونه‌ها در تحقیق اخیر در دستور کار قرار می‌گیرد.

۳-۵- اعمال مکانیزم پیش‌تنیدگی در مدلها

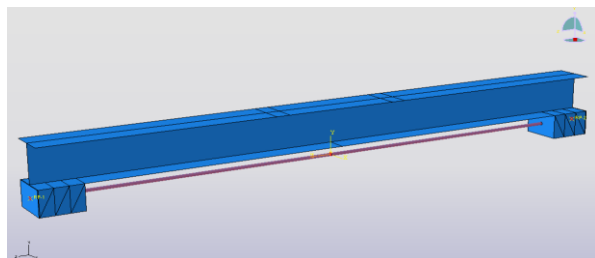
با توجه به انتخاب روش پس‌کشیدگی تاندون‌ها جهت پیش‌تنیده ساختن تیرهای فولادی I شکل در مدلسازی اخیر، جزئیات اعمال این روش در مدلها و نحوه معرفی آن به نرم‌افزار، یکی از نکات حائز اهمیت در این تحقیق به شمار می‌رود که به صورت زیر تشریح می‌گردد:

بدیهی است تاندون‌ها، که برای پیش‌تنیده کردن و تقویت ظرفیت خمشی تیرهای فولادی در محل مناسبی از بدنه آنها نصب می‌گردند، بایستی بال پائینی تیر را که در حین بارگذاری برای کشش کار می‌کند به نحو مقتضی تحت فشار قرار دهند. روش پس‌کشیدگی که بعنوان روش اصلی در این تحقیق جهت اعمال پیش‌تنیدگی در تیرهای فولادی مورد استفاده قرار گرفته است، بدین صورت اجرا می‌شود که ابتدا طول اولیه تاندون مورد نظر مطابق مقدار بدست آمده از محاسبات انجام گرفته براساس روابط مقدماتی مربوط به تغییر طول

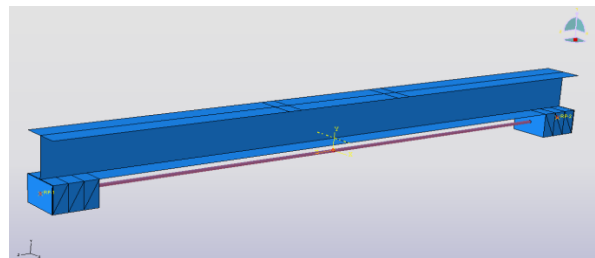
مدول Part اولین مرحله مدلسازی یک سازه است در این مرحله مدل از نظر هندسی، یا بطور کامل ساخته می‌شود و یا اجزاء آن ایجاد شده و در مدول اسمبلی مونتاژ می‌شوند. نمونه‌ها دارای مشخصات مصالح یکسان هستند که باید در مدول Property به برنامه معرفی شده و به اجزاء تشکیل‌دهنده آنها اختصاص داده شوند. مشخصات مصالح مصرفی برای هر شش مدل بصورت جدول ۱ می‌باشد. در مدول Assembly نیز اجزاء ساخته شده در مدول Part کنار هم قرار گرفته و هندسه مدل را با تمام جزئیات تشکیل می‌دهند. شکل ۵ مدلهای تکمیل شده نمونه‌ها را نشان می‌دهد.



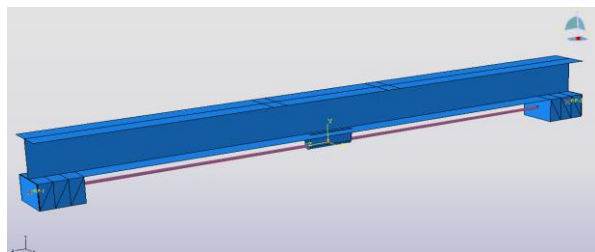
نمونه تیپ A (تیر کنترل)



نمونه تیپ B (با یک تاندون میلگردی، بدون پیش‌تنیدگی)



نمونه تیپ C (با یک تاندون میلگردی، با پیش‌تنیدگی ۹۸KKN)



نمونه تیپ D (با یک تاندون میلگردی، با فاصله نگهدار، با پیش

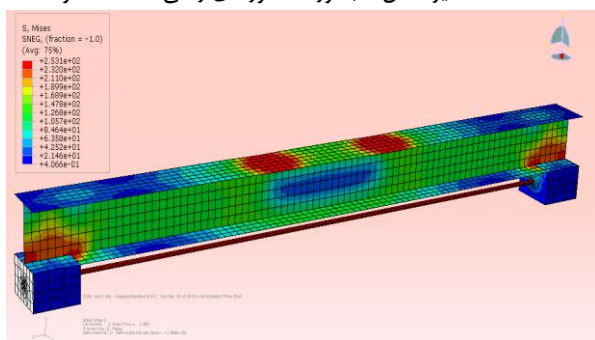
تنیدگی ۹۸KKN)

دومین قیدی که در این مرحله معرفی می‌گردد به سطوح تماس میان صفحات صلب طرفین تاندون و صفحات نگهدارنده تاندون‌ها بالای تکیه‌گاه‌ها در طرفین تیر مربوط است.

۵-۶- مش‌بندی و اجرای تحلیل نهایی

با انتخاب ابعاد مش بندی (سید) مناسب و نیز تعیین نوع المان مربوطه (المان S4R برای تیرهای فولادی و المان C3D8R برای تاندون‌ها) نسبت به مش‌بندی هر کدام از نمونه‌های تحت بررسی اقدام می‌گردد.

در نهایت با ایجاد و معرفی یک Job به تحلیل نهایی نمونه‌ها پرداخته می‌شود. به محض کامل شدن پروسه تحلیل نهایی در پنجره مربوطه، با انتخاب گزینه Result می‌توان نتایج تحلیل را در مدول Visualization نظیر شکل ۶ بصورت کنتورهای رنگی مشاهده نمود.



شکل ۶- مدول Visualization در حالت Plot Contours

۶ - ارزیابی و مقایسه نتایج آنالیز عددی با داده‌های آزمایشگاهی

آنچه در بند ۵ انجام گرفت، نحوه مدلسازی و تحلیل نرم‌افزاری یک نمونه از تیرهای ساخته شده در آزمایشگاه، با در نظر گرفتن تمام جزئیات مربوطه بود، و آنچه در این بخش ارائه می‌شود، ارزیابی نتایج بدست آمده از روش المان محدود برای مدل‌های ساخته شده و مقایسه آنها با نتایج آزمایشگاهی بصورت جدول و نمودار و با ذکر درصد اختلاف موجود، می‌باشد.

همانطوری که قبلاً نیز اشاره شد مدل تیپ A بصورت یک تیر فولادی در حالت عادی، بدون نصب تاندون و اعمال نیروی پیش‌تیندگی، صرفاً بعنوان تیر کنترل جهت مقایسه با تیرهای سایر نمونه‌ها در نظر گرفته شده است.

پس از اعمال بار گسترده فشاری به اندازه ۲۰۰ کیلونیوتن (معادل ۶/۶۷ نیوتن بر میلی‌متر مربع، با توجه به ابعاد پارامتر بار ایجاد شده روی بال فوقانی تیر در مرحله مدلسازی) بر روی مدل، تیر مذکور تحت خمش قرار گرفته و تنش خمشی (ناشی از فشار و کشش)، کرنش و تغییر مکان ایجاد شده در نواحی مختلف بالها و جان مقطع توسط نرم‌افزار اندازه‌گیری و ارائه می‌گردد. اشکال ۷ و ۸ به ترتیب نحوه توزیع تنش و خیز در نواحی مختلف تیر فولادی راه، با مقادیر

اجسام در مقاومت مصالح، اندکی کوتاهتر از طول دهانه تیر انتخاب می‌گردد]۶].

در ادامه قبل از اعمال بارهای خارجی بر روی سازه، نیروهای کششی وارد را حذف نموده و همزمان یک سطح تماس مابین وجه داخلی صفحات صلب طرفین تاندون و وجه خارجی صفحات نگهدارنده (تکیه‌گاه‌ها) تعریف می‌شود، که با مهار تاندون‌ها در میان تکیه‌گاه‌های طرفین، مانع از کوتاهتر شدن طول آنها از طول دهانه می‌گردد. بدین ترتیب طول تاندون تا یک حد معین کاهش یافته و سپس در اندازه‌های برابر با طول تیر ثابت می‌ماند. در نتیجه تداوم تمایل تاندون مورد نظر به کاهش طول و رسیدن به طول اولیه خود، منجر به پیش‌تیندگی تیر فولادی می‌گردد.

۵-۴- بارگذاری مدل‌ها و معرفی گامهای حل

همانطوری که در بند قبل نیز تا حدی اشاره گردید، بارگذاری مدل‌های ساخته شده در سه مرحله متمایز شرح زیر صورت می‌گیرد.

مرحله اول: در این مرحله نیروهای کششی تحت عنوان نیروهای پیش‌تیندگی از هر دو سمت چپ و راست به صفحات صلب طرفین تاندون‌ها در مدل‌ها اعمال می‌گردد.

مرحله دوم: در این مرحله نیروهای کششی اعمال شده در مرحله قبل، حذف و سطح تماس بین وجه داخلی صفحات صلب طرفین تاندون‌ها و وجه خارجی صفحات نگهدارنده تاندون‌ها به منظور ممانعت از کوتاه شدن طول تاندون‌های کشیده شده از طول دهانه تیر، در هر دو سمت مدل ایجاد می‌گردد.

مرحله سوم: در این مرحله نیز با تداوم سطح تماس ایجاد شده در مرحله دوم، بارهای خارجی بصورت گسترده بر بال فوقانی تیر فولادی پیش‌تینده توسط تاندون‌ها، اعمال می‌گردد.

با توجه به مراحل مختلف ذکر شده فوق و مقدار و نحوه بارگذاری که در هر مرحله متمایز از مراحل دیگر می‌باشد، برای هر مرحله تحلیل یک گام تعریف می‌گردد.

۵-۵- معرفی سطوح تماس و اندرکنش بین اجزاء

در مدول Interaction رفتارهای تماسی مکانیکی و قیود و اتصالات در صورت وجود اعمال می‌شوند. آنچه برای مدل حاضر در این قسمت حائز اهمیت است نحوه معرفی صفحات دو انتهای تاندون بصورت جسم صلب می‌باشد. کل نیروهای کششی اعمالی جهت پیش‌تینده نمودن تیرهای فولادی به صفحات صلب طرفین تاندون‌ها وارد می‌شود و از طریق آن به خود تاندون‌ها منتقل می‌گردد. از اینرو آنچه اجتناب‌ناپذیر است تغییر شکل‌های موضعی و اثرات نامطلوبی است که نیروهای وارد شده روی صفحات مذکور ایجاد می‌کنند. برای جلوگیری از این اثرات مخرب، کل صفحات قائم طرفین تاندون‌ها که در نتایج نهایی تحقیق نیز دخالتی ندارند، بصورت یک قطعه کاملاً صلب که وارد تحلیل نمی‌شود، معرفی می‌گردد.

همانگونه که در جدول فوق مشاهده می‌شود اختلاف مقادیر بدست آمده از تحلیل نرم‌افزاری با نتایج آزمایشگاهی، برای مدل اخیر کاملاً منطقی به نظر می‌رسد. مقدار خیز مربوط به ناحیه وسط دهانه در هر دو حالت بررسی تحلیلی و آزمایشگاهی، با همدیگر دارای اختلاف بسیار جزئی بوده (کمتر از یک درصد) و تقریباً برابرند. کرنش بال پایینی بدست آمده از تحلیل عددی نیز، حدود ۱۲ درصد کوچکتر از نتیجه آزمایشگاهی است که می‌تواند بدلیل برخی از عوامل تأثیرگذار بر روی نمونه‌ها نظیر دمای محیط آزمایشگاه، باشد.

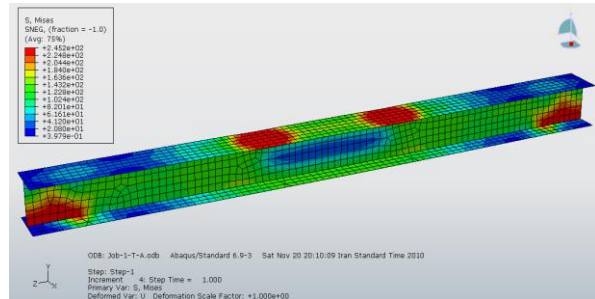
نتایج سایر نمونه‌ها نیز مشابه نمونه تیپ A پس از آنالیز در جداول مربوطه مورد ارزیابی و مقایسه قرار می‌گیرد. (بجز نمونه تیپ B که بدون اعمال نیروی پیش‌تندگی بوده و در واقع عملکردی مشابه تیپ A دارد). مقایسه صورت گرفته بین نتایج دو نوع بررسی آزمایشگاهی و تحلیلی در تمامی مدلها حاکی از اینست که امکان مدل‌سازی نسبتاً دقیق در این نمونه‌ها مقدور بوده و صرفاً حداکثر ۱۲ درصد خطا مشاهده می‌گردد، لذا ضرورتی برای بررسی مدلهای دیگر از لحاظ آزمایشگاهی وجود نداشته و می‌توان جهت مطالعه و ارزیابی نمونه‌ها به روش تحلیل نرم‌افزاری استناد نمود.

با توجه به نتایج تحلیلی استخراجی مربوط به نمونه‌ها به منظور تعیین نقش عوامل مؤثر در تقویت رفتار خمشی و ارزیابی ظرفیت باربری آنها، مقادیر مربوط به شاخص‌های تنش، کرنش و خیز در وسط دهانه هر کدام از نمونه‌ها در یک جدول کلی نظیر جدول ۴ گردآوری و با تیر کنترل تیپ A مقایسه می‌گردند.

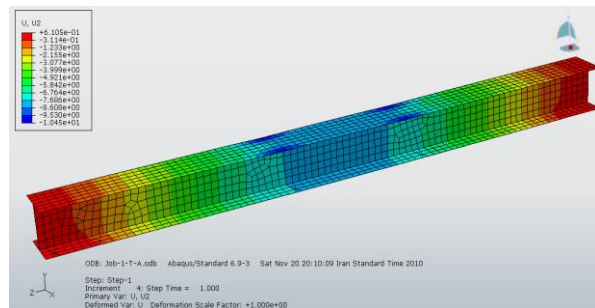
جدول ۴- مقایسه کلی نتایج حاصل از تحلیل نرم‌افزاری مدل‌ها با نمونه کنترل

| نمونه | تنش بال پایینی تیر در وسط دهانه (N/mm ²) | | کرنش بال پایینی تیر در وسط دهانه (10 ⁻⁶) | | تغییر مکان (خیز) تیر در وسط دهانه (mm) | |
|-------|--|--|--|--|--|--|
| | بهبود ظرفیت خمشی تیر نسبت به تیر کنترل (%) | بهبود ظرفیت خمشی تیر نسبت به تیر کنترل (%) | بهبود ظرفیت خمشی تیر نسبت به تیر کنترل (%) | بهبود ظرفیت خمشی تیر نسبت به تیر کنترل (%) | بهبود ظرفیت خمشی تیر نسبت به تیر کنترل (%) | بهبود ظرفیت خمشی تیر نسبت به تیر کنترل (%) |
| A | 133 | 12.6 | 1167 | 17.9 | 8.147 | 5.4 |
| C | 116.25 | 12.6 | 958 | 17.9 | 7.708 | 5.4 |
| D | 99.95 | 24.8 | 555 | 52.4 | 6.676 | 18 |
| E | 110.25 | 17.1 | 878 | 24.7 | 6.631 | 18.6 |
| F | 74.53 | 43.9 | 426 | 63.5 | 6.629 | 18.6 |

مربوط به هر زون پس از تحلیل نمونه A در صفحه نتایج برنامه نشان می‌دهند.



شکل ۷- توزیع تنش در نمونه تیپ A



شکل ۸- توزیع خیز در نواحی مختلف نمونه تیپ A

در ادامه، با توجه به منحنی‌های آزمایشگاهی مربوط به رابطه بار-خیز و بار-کرنش بال پایینی در وسط دهانه، مربوط به نمونه تیپ A، ارائه شده در اشکال ۲ و ۴ و تعیین مقادیر کرنش و خیز متناسب با بار ۲۰۰ کیلونیوتن از نمودارهای مذکور، به مقایسه نتایج حاصل از دو حالت بررسی تحلیلی و آزمایشگاهی در جدول ۳ پرداخته می‌شود.

جدول ۳- مقایسه نتایج حاصل از نرم‌افزار با نتایج آزمایشگاهی در مدل تیپ A

| خیز در وسط دهانه (mm) | کرنش بال پایینی در وسط دهانه (10 ⁻⁶) | تنش بال پایینی در وسط دهانه (N/mm ²) | نیروی پیش‌تندگی (KN) | بار اعمال شده روی نمونه (KN) | روش بررسی |
|-----------------------|--|--|----------------------|------------------------------|-------------|
| 8.147 | 1167 | 133 | 0 | 200 | نرم افزار |
| 8.120 | 1333 | 0 | 0 | 200 | آزمایشگاه |
| 0.33 | 12.4 | 0 | - | - | درصد اختلاف |

پیش تنیده شده با تاندونهای میلگردی بصورت دابل، بطور قابل توجهی افزایش یافتند.

۳- همچنین نصب فاصله نگهدار در ایجاد اثرات تقویتی خیلی مفید است. فاصله نگهدارها بطور مجزا بر کرنش ناحیه کششی در وسط دهانه تیرهای فولادی اثر نموده و ظرفیت خمشی آنها را تا حد زیادی بهبود میبخشند.

۴- با توجه به نتایج حاصل از تحلیل نرم افزاری مدلها و مقایسه آنها با تیر کنترل (نمونه تیپ A) معلوم می‌گردد که با بکارگیری تکنیک پیش تنیدگی بصورت دو تاندون میلگردی با اعمال نیروی پیش تنیدگی ۱۹۶ کیلو نیوتن و نصب فاصله نگهدار در وسط دهانه (به فرم نمونه تیپ F)، شاخص‌هایی نظیر تنش، کرنش و خیز بال پایین در وسط دهانه تیر که در واقع بیانگر رفتار خمشی تیرهای فولادی می‌باشند، هر کدام به ترتیب به میزان ۴۴، ۶۳ و ۱۸ درصد بهبود می‌یابند.

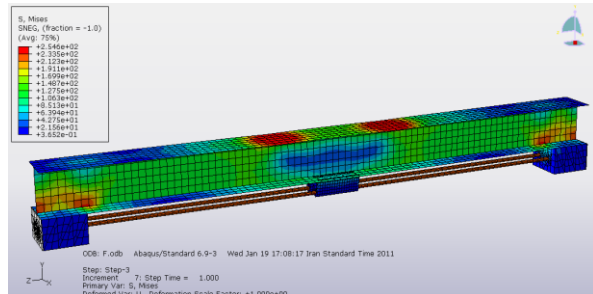
۸. مراجع

- [1] Nunziata, V., Prestressed steel structures design: a new frontier for structural engineering, Studio Nunziata, Palma Campania, Napoli, Italy; 1999.
- [2] Ozcatalbas Y., Ozer A., Investigation of fabrication and mechanical properties of internally prestressed steel I-beam. Materials and Design 2007; 28:1988-1993.
- [3] Belletti B., Gasperi A., Behavior of prestressed steel beams. Journal of Structural Engineering © ASCE; 2010.
- [4] Park S., Kim T., Flexural behavior of steel I-beam prestressed with externally unbonded tendons. Journal of Construction Steel Research; 66:125-132; 2010.
- [5] Abaqus 6.9, Documentation: Abaqus/CAE User's Manual, Abaqus Analysis User's Manual, Abaqus Example Problems Manual, Abaqus Theory Manual.

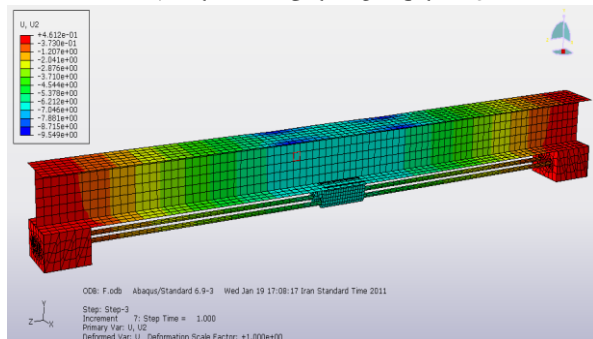
[۶] یادگاری، افشین، "مقاوم‌سازی تیرهای فولادی I شکل به روش پیش تنیدگی"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی سازه، دانشگاه آزاد واحد مراغه، ۱۳۸۹.

همانطوریکه از جدول ملاحظه می‌گردد، ستونهای دوم مربوط به نمونه‌ها در جدول فوق، بیانگر میزان بهبود صورت گرفته در زمینه عملکرد خمشی (شامل شاخص‌هایی نظیر تنش، کرنش و خیز) هر کدام از نمونه‌های پیش تنیده تحت بررسی، نسبت به تیر فولادی در حالت عادی (تیر کنترل) بر حسب درصد می‌باشد. نمونه‌ای نظیر مدل تیپ F که توسط دو رشته تاندون میلگردی، با نصب فاصله نگهدار و نیروی پیش تنیدگی ۱۹۶ کیلو نیوتن پیش تنیده می‌گردد، بهترین عملکرد خمشی را در مقایسه با سایر نمونه‌های گروه به نمایش می‌گذارد.

نتایج تحلیل نرم افزاری شامل مقادیر و نحوه توزیع تنش و خیز در نواحی مختلف مدل مربوط به نمونه اخیر در شکل زیر نشان داده می‌شود.



شکل ۹- توزیع تنش در نواحی مختلف نمونه تیپ F



شکل ۱۰- توزیع خیز در نواحی مختلف نمونه تیپ F

۷. نتایج

۱- مقایسه صورت گرفته بین نتایج دو نوع بررسی آزمایشگاهی و تحلیلی به روش المان محدود در تمامی مدلها حاکی از تطابق مناسب و منطقی میان آنهاست، بنابراین امکان مدل‌سازی نسبتاً دقیق در این نمونه‌ها مقدور بوده، لذا ضرورتی برای بررسی سایر مدلها بصورت آزمایشگاهی نمی‌باشد.

۲- خیزها، تنشها و کرنشها در نواحی مختلف تیرها و تاندونها در نمونه‌ها، به محض اعمال بارهای خارجی، اندازه‌گیری شدند و بررسی آنها نشان داد که بار تسلیم و نهایی تیرهای فولادی

Evaluation of Flexural Performance of Steel I-Beams Prestressed with Unbounded Bar Tendons by Numerical Analysis Method

Afshin Yadegari*

Department of Civil Engineering, Maragheh University of Technology, Maragheh, Iran

M.Ali Lotfollahi

Department of Civil Engineering, Tabriz University, Tabriz, Iran

Rasoul Khodayari

Ministry of Road and Urban Development, East Azarbayjan Provincial Department of
Road Maintenance and Transporting, Tabriz, Iran

Abstract:

The basic purpose of applying the prestressing technique in steel structures is section weight decrease via increasing their load-carrying capacity, eventually led to the technical and economical advantages of such structures. In this paper, prestressing method in steel I-beams, as post-tensioning of the external tendons installed in various samples of steel beams to determine the increase of flexural strength and improve load capacity, analysed and evaluated by ABAQUS finite element software. Considering suitable corresponding between the existence of experimental results and analysis done for each sample indicate that applying the prestressing technique, improve Flexural behavior of beams in terms of bending stress, strain and mid span deflection.

Keywords: Bar tendon, Prestressing technique, Flexural behavior, Deflection, Numerical Analysis method