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

افشین یادگاری*
مربی، 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 آذربایجان‌شرقی، 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 بواسطهٔ 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 هرکدام 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.

Archive of SID
www.SID.ir

۱- مقدمه

ایدهٔ بکارگیری تکنولوژی پیش‌تنیدگی جهت مقاوم‌سازی سازه‌ها در چند دهه اخیر مورد توجه مهندسین طراح و محاسب قرار گرفته است. اعمال این فن‌آوری در سازه‌های فولادی، دارای عمر طولانی نبوده و درسالهای اخیر با توسعه صنعت فولاد در زمینه‌هایی نظیر احداث ساختمان، پل‌سازی و ...، بطور جدی مطرح شده است. فن آوری پیش‌تنیدگی بعنوان روشی آسان وکاربردی، برای مقاوم‌سازی سازه‌های فولادی دردست طراحی و نیز جهت تقویت سازه‌های احداث شده، قابل اجرا می‌باشد[۱]. از اینرو مطالعهٔ اخیر با ارائه و تحلیل مدلهای متنوعی به ارزیابی رفتار خمشی تیرهای فولادی ساختمانی تقویت شده به روش پیش‌تنیدگی پرداخته و نقش عوامل مؤثر جهت بهبود این رفتار را آشکار می‌سازد.

۲- روش تحقیق

برای دستیابی به هدف اصلی در این تحقیق که بررسی عملکرد و بهبود رفتار خمشی تیر های فولادی I شکل پیش‌تنیده شده با تاندونهای میلگردی خارجی می‌باشد، لازم بود نمونه‌هایی جهت بررسی به روشهای آزمایشگاهی و تحلیلی تهیه گردند. بدین منظور شش تیر فولادی بعنوان مدلهای مطرح شده در تحقیقات قبلی، که به اشکال مختلف پیش‌تنیده شده و تحت بارهای متنوع خارجی قرار گرفته بودند و نیز نتایج آزمایشگاهی مربوط به آنها ارائه شده بود، جهت مدلسازی و تحلیل با نرم‌افزار المان محدود ABAQUS انتخاب گردیدند.

پس از تحلیل نمونه‌ها، 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 منا سبی بین این دو روش مشاهده گردید. ضمناً نقش هر کدام از متغیرهای مؤثر در این تحقیق شامل تعداد تاندون‌ها، مقدار نیروی پیش‌تنیدگی اعمالی و وجود فاصله نگهدارها، در بهبود عملکرد خمشی تیرهای فولادی پیش‌تنیده مورد بررسی قرار گرفت.

۳- مروری برتحقیقات گذشته

طی دهه گذشته تحقیقات و مطالعات متعددی بطور خاص در زمینه پیش‌تنیدگی سازه‌های فولادی در دانشگاه‌ها، و مراکز تحقیقاتی کشورهای مختلف دنیا، تو سط محققان صورت گرفته و نتایج بد ست آمده در قالب مقالاتی معتبر منتشر گردیده است که به چند نمونه از آنها اشاره می‌گردد:

در سال ۲۰۰۶ دو متالوژیست از کشور ترکیه به نامهای Y.Ozcatalbas و A.Ozer در پژوهشی مشترک تحت عنوان " تحقیق در زمینه ساخت و بررسی خواص مکانیکی تیر فولادی I شکل پیش‌تنیده بصورت داخلی"، ساخت یک تیر فولادی I شکل بصورت ترکیبی از یک پروفیل T شکل و یک ورق فولادی پیش تنیده را پیشنهاد و خواص مکانیکی آن را مورد بررسی قرار دادند [۲]. در این مطالعه در حالیکه ورقهای فولادی پیش‌تنیده، تحت کشش الاستیک پیش‌تنیدگی مختلفی قرار گرفته‌اند توسط جوشکاری با گاز خنثی به پروفیل T شکل متصل می‌گردند و بدین ترتیب یک تیر فولادی پیش تنیده با مقطع هندسی I شکل را تشکیل می‌دهند.

در سال ۲۰۰۸ ، B.Belletti و A.Gasperi دو محقق ایتالیایی نیز، در تحقیقی مشترک با عنوان " رفتار تیرهای فولای پیش‌تنیده " به بررسی عملکرد تیرهای فولادی با مقطع I شکل و پیش‌تنیده شده با تاندون‌های 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 می‌گردد [۳].

سرانجام در سال ۲۰۰۹ دو محقق از کره جنوبی با اسامی Sunkyu Park و Taewan Kim اقدام به انتشار مقاله‌ای تحت عنوان " رفتار خم شی تیر فولادی I شکل پیش‌تنیده شده با تاندون های خارجی غیر چسبیده " نمودند [۴]. آنها در این تحقیق رفتار خمشی و اثرات تقویتی تیرهای فولادی I شکل توأم با تاندون‌های خارجی غیرچسبیده، که با استفاده از تکنیک پس‌کشیدگی خارجی، پیش‌تنیده می‌گردند را مورد مطالعه قرار دادند و سپس با ارائه راه‌حل های تئوریکی و بررسی‌های آزمایشگاهی روی نمونه‌های متعدد به نتایج قابل توجهی دست یافتند.

در واقع تحقیق حاضر نیز در راستای همین مطالعهٔ آزمایشگاهی اخیر می‌با شد که نمونه‌های ارائه شده را مجدداً بـ صورت تحلیلی و به روش المان محدود مورد بررسی قرار داده و به مقایسهٔ عددی نتایج بدست آمده از دو نوع بررسی می‌پردازد. از اینرو در ادامه با توجه اهمیت مو ضوع به تف صیل، به برر سی و ت شریح جزئیات تحقیق اخیر پرداخته می‌شود.

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 پیش‌تنیده ساختن و ارزیابی اثرات تقویتی در حالتهای مختلف بکار گرفته می‌شوند. نیروی پیش‌تنیدگی معادل ۹۸ کیلونیوتن به هرکدام از تاندون‌ها اعمال می‌گردد. یک تیر فولادی نیز بدون پیش‌تنیدگی بعنوان تیر کنترل در نظرگرفته شده و با سایر تیرهای پیش‌تنیده خارجی به منظور مشاهده بهبود در رفتار خمشی، مقایسه می‌گردد. علاوه بر آنها اثرات فاصله نگهدار نیز در رفتار خمشی تیرها مورد آزمایش قرار می‌گیرد.

۴-۱- ساخت نمونه‌های 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

Archive of SID

www.SID.ir

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

جدول۱- مشخصات مصالح مصرفی در نمونه های 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

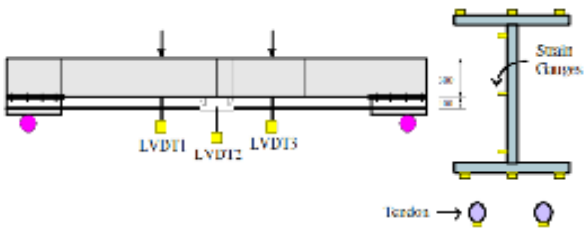
تمامی نمونه‌ها (به استثنای نمونه تیپ A که بعنوان تیر کنترل در نظر گرفته شده است) شامل تیرهایی هستند که با تاندون میلگردی پیش‌تنیده شدند، بطوریکه برخی با یک تاندون یا بدون فاصله نگهدار و مابقی آنها دارای دو تاندون توأم با فاصله نگهدار یا بدون آن می‌باشند. با اعمال نیروی پیش‌تنیدگی به مقدار ۹۸ کیلو نیوتن به هرکدام از تاندون ها، 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.

جدول۲- مشخصات تیرهای پیش‌تنیده شده با تاندونهای میلگردی

نمونه ها	فرضیات پیش تنیدگی		
	نیروی پیش تنیدگی(KN)	فاصله نگهدار	تعداد میلگرد
A	-	NO	-
B	-	NO	1
C	98	NO	1
D	98	YES	1
E	196	NO	2
F	196	YES	2

۴-۲- ارزیابی نتایج آزمایشگاهی

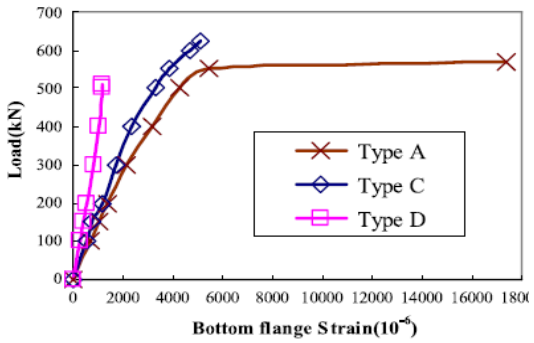
در این تحقیق رفتار خمشی تیرهای فولادی I شکل پیش‌تنیده شده بو سیله تاندون‌های خارجی، با نصب کرنش سنج‌ها و گیرندگان تغییرات جابجایی خطی (خیز سنج‌ها) و اندازه‌گیری کرنش تاندون و نیز کرنش و خیز بال پایین تیر در وسط دهانه تحت اعمال نیروهای پیش‌تنیدگی مورد بررسی قرار می‌گیرد.



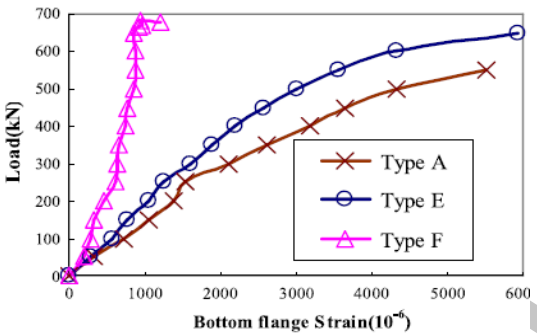
شکل۱- نصب کرنش سنج‌ها و خیز سنج‌ها در نمونه‌ها

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 شکل۲- (a) و(b) ترسیم می‌گردند.



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



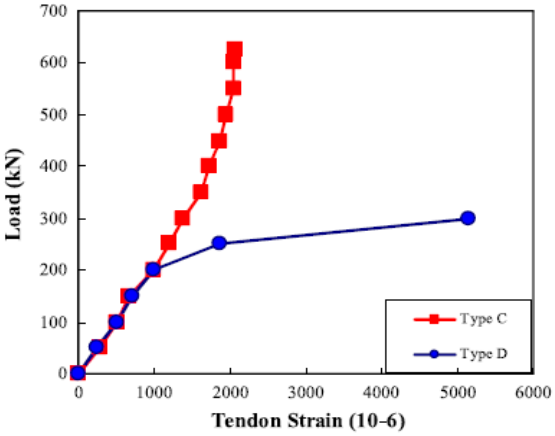
(b) Load-strain relation for 2 bar prestressing.

شکل۲- رابطه بار- کرنش در بال پائینی نمونه‌ها

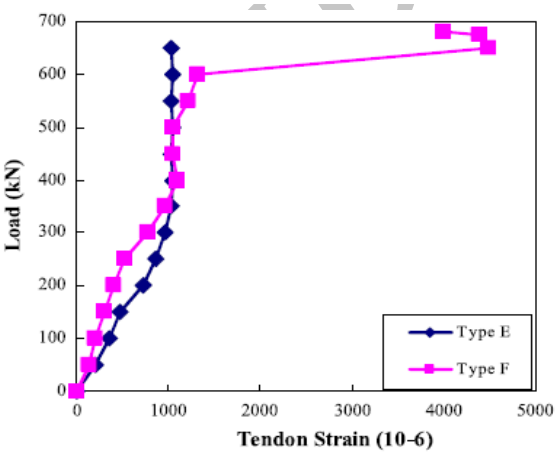
ب- رفتار تاندون‌های میلگردی در نمونه‌ها :

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

Archive of SID
www.SID.ir



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



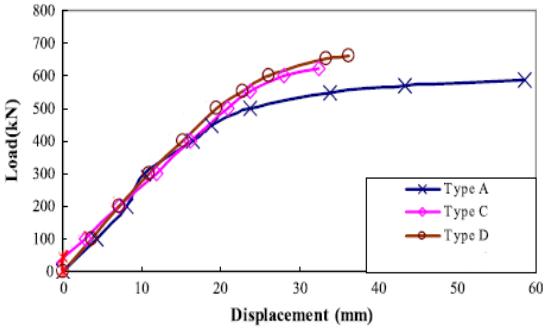
(b) Load-strain relation for 2 bar prestressing.

شکل۳- رابطه بار- کرنش تاندون، درنمونه‌های 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 بعلت 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 نمودار های شکل(b) نشان داده می شود. درحالت کلی اعمال میزان پیش‌تنیدگی اختصاص یافته زمانی‌که فاصله نگهدار بکار برده می شود، قابل توجه است.

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.

شکل۴- 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 هرکدام از نمونه‌ها درتحقیق حاضر می‌نمائیم.

۵. تحلیل نرم‌افزاری

با پیشرفت روزافزون امکانات نرم‌افزاری و سخت‌افزاری در چند دهه اخیر، استفاده از نرم‌افزارهای المان محدود در حل مسائل مهندسی پیشرفت قابل توجهی پیدا کرده است. نرم‌افزار المان 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] .

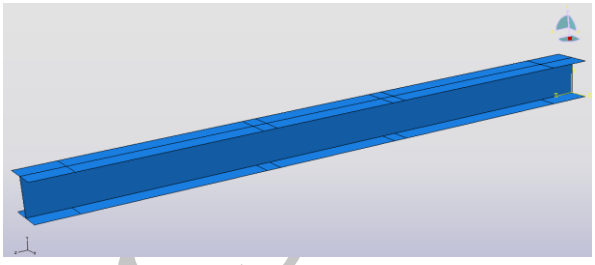
۵-۱- مدلسازی نمونه‌ها

شش نمونهٔ تیر فولادی پیش‌تنیده، به ترتیب مدلسازی می گردند. ابعاد تیرها و تاندون‌ها در تمام نمونه‌ها یکسان است ولی تعداد تاندونها، نصب فاصله نگهدار و مقدار نیروی پیش‌تنیدگی اعمالی درآنها 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.

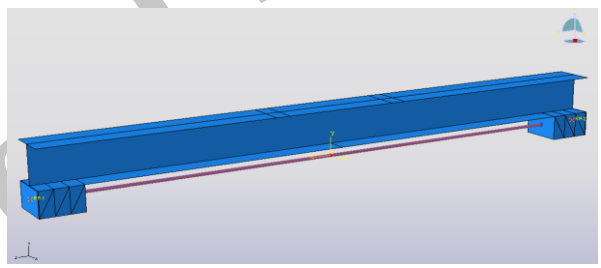
Archive

www.SID.ir

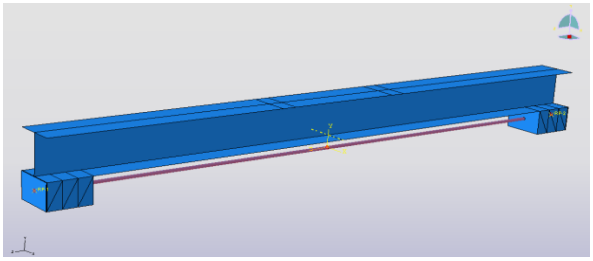
مدول Part اولین مرحلهٔ مدلسازی یک سازه است در این مرحله مدل از نظر هندسی، یا بطور کامل ساخته می شود و یا اجزاء آن ایجاد شده و در مدول ا سمبلی مونتاژ می شوند. نمونهها دارای م شخ صات مصالح یکسان هستند که باید در مدول Property به برنامه معرفی شده و به اجزاء ت شکیلدهندهٔ آنها اخت صاص داده شوند. م شخ صات مصالح مصرفی برای هر شش مدل بصورت جدول۱ میباشد. در مدول Assembly نیز اجزاء ساخته شده در مدول Part کنار هم قرار گرفته و هندسهٔ مدل را با تمام جزئیات تشکیل میدهند. شکل ۵ مدلهای تکمیل شدهٔ نمونهها را نشان میدهد.



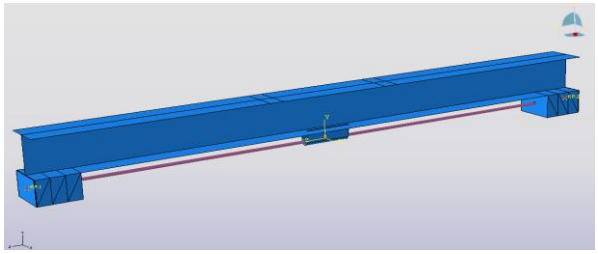
نمونهٔ تیپ A (تیر کنترل)



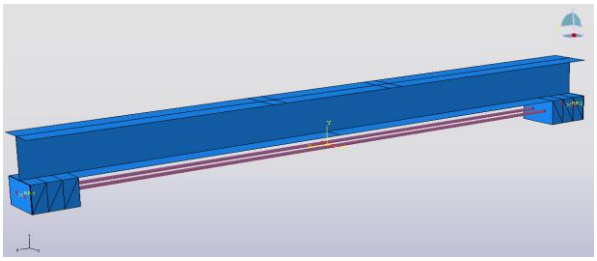
نمونهٔ تیپ B (با یک تاندون میلگردی، بدون پیش‌تنیدگی)



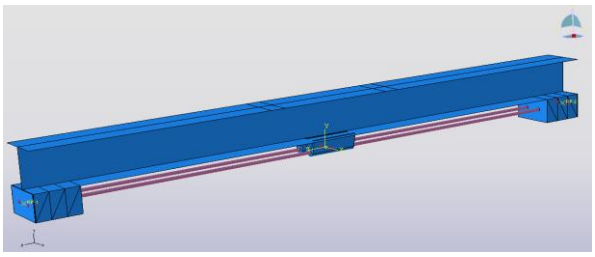
نمونهٔ تیپ C (با یک تاندون میلگردی، با پیش تنیدگی۹۸KN)



نمونهٔ تیپ D (بایک تاندون میلگردی، با فاصله نگهدار، با پیش تنیدگی۹۸KN)



نمونهٔ تیپ E (با دو تاندون میلگردی، با پیش‌تنیدگی۱۹۶KN)



نمونهٔ تیپ F (با دو تاندون میلگردی، با فاصله نگهدار، با پیش تنیدگی۱۹۶KN)

شکل۵- نمونه‌های مدلسازی شده از تیرهای پیش‌تنیده

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

آنالیز پوش‌آور معمولی یکی از روش‌هایی ا ست 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 ثقلی و جانبی بطور همزمان می باشد. این روش جهت انجام تحلیل روی نمونهها در تحقیق اخیر در دستور کار قرار می گیرد.

۵-۳- اعمال مکانیزم پیش تنیدگی در مدلها

با توجه به انتخاب روش پس‌کشیدگی تاندون‌ها جهت پیش تنیده 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 ب شمار می‌رود که ب صورت زیر ت شریح می گردد:

بدیهی است تاندون ها، که برای پیش‌تنیده کردن و تقویت ظرفیت خمشی تیرهای فولادی در محل مناسبی از بدنهٔ آنها نصب می‌گردند، بای ستی بال پائینی تیر را که در حین بارگذاری برای ک شش 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 ا ستفاده قرار گرفته ا ست، بدین صورت اجرا می شود که ابتدا طول اولیهٔ تاندون مورد نظر مطابق مقدار بد ست آمده از محاسبات انجام گرفته براساس روابط مقدماتی مربوط به تغییر طول

Archive of SID
www.SID.ir

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 وارده را حذف نموده و همزمان یک سطح تماس مابین وجه داخلی صفحات صلب طرفین تاندون و وجه خارجی صفحات نگهدارنده (تکیه‌گاه‌ها) تعریف می شود، 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 اندازه‌ای برابر با طول تیر ثابت می‌ماند. در نتیجه تداوم تمایل تاندون مورد نظر به کاهش طول و رسیدن به طول اولیه خود، منجر به پیش‌تنیدگی 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 بشرح زیر صورت می‌گیرد.

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

مرحلهٔ دوم: در این مرحله نیروهای کششی اعمال شده در مرحلهٔ 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.

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

با توجه به مراحل مختلف ذکر شدهٔ فوق و مقدار و نحوهٔ بارگذاری که در هر مرحله متمایز از مراحل دیگر می باشد، برای هر مرحلهٔ تحلیل یک گام تعریف می‌گردد.

۵-۵- معرفی سطوح تماس و اندرکنش بین اجزاء

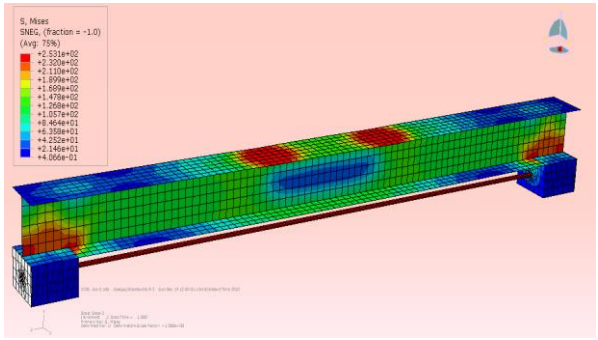
در مدول Interaction رفتارهای تماسی مکانیکی و قیود و اتصالات در صورت وجود اعمال می شوند. آنچه برای مدل حاضر در این قسمت حائز اهمیت است نحوهٔ معرفی صفحات دو انتهای تاندون بصورت جسم صلب می‌باشد. کل نیروهای کششی اعمالی جهت پیش تنیده نمودن تیرهای فولادی به صفحات صلب طرفین تاندونها وارد می‌شود و از طریق آن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

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 هرکدام از نمونه‌های تحت بررسی اقدام می‌گردد.

در نهایت با ایجاد و معرفی یک Job به تحلیل نهایی نمونه‌ها پرداخته می شود. به محض کامل شدن پروسهٔ تحلیل نهایی در پنجرهٔ مربوطه ، با انتخاب گزینهٔ Result می‌توان نتایج تحلیل را در مدول Visualization نظیر شکل ۶ بصورت کنتورهای رنگی مشاهده نمود.



شکل۶- مدول Visualization در حالت Plot Contours

۶ - ارزیابی و مقایسه نتایج آنالیز عددی با داده‌های آزمایشگاهی

آنچه در بند ۵ انجام گرفت، نحوهٔ 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 مقایسهٔ آنها با نتایج آزمایشگاهی بصورت جدول و نمودار و با ذکر درصد اختلاف موجود، می‌باشد.

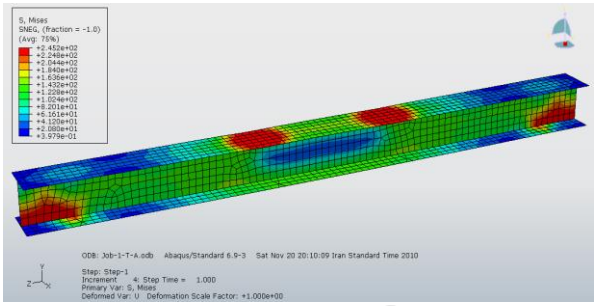
همانطوری‌که قبلاً نیز اشاره شد مدل تیپ A بصورت یک تیر فولادی در حالت عادی، بدون نصب تاندون و اعمال نیروی پیش تنیدگی، صرفاً بعنوان تیر کنترل جهت مقایسه با تیرهای سایر نمونه‌ها در نظر گرفته شده است.

پس از اعمال بار گستردهٔ فشاری به اندازهٔ ۲۰۰ کیلونیوتن (معادل ۶/۶۷ نیوتن بر میلیمتر مربع، با توجه به ابعاد پارتیشن 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 نحوهٔ توزیع تنش و خیز در نواحی مختلف تیر فولادی را، با مقادیر

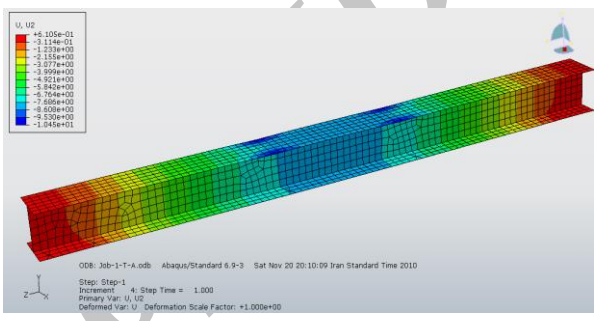
Archive of SID

www.SID.ir

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



شکل۷- توزیع تنش در نمونه تیپ A



شکل۸- توزیع خیز در نواحی مختلف نمونه تیپ A

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

جدول۳- مقایسهٔ نتایج حاصل از نرم‌افزار با نتایج آزمایشگاهی در مدل تیپ A

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

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 ناحیهٔ 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 نتیجهٔ 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 پیش‌تنیدگی بوده و در واقع عملکردی مشابه تیپ A دارد). مقایسهٔ صورت گرفته بین نتایج دو نوع برر سی آزمایشگاهی و تحلیلی در تمامی مدلها حاکی از اینست که امکان مدل سازی نسبتاً دقیق در این نمونه‌ها مقدور بوده و صرفاً حداکثر ۱۲ درصد خطا مشاهده می‌گردد، لذا ضرورتی برای برر سی 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 ا ستخراجی 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 هرکدام از نمونه‌ها در یک جدول کلی نظیر جدول ۴ گردآوری و با تیر کنترل تیپ A مقایسه می‌گردند.

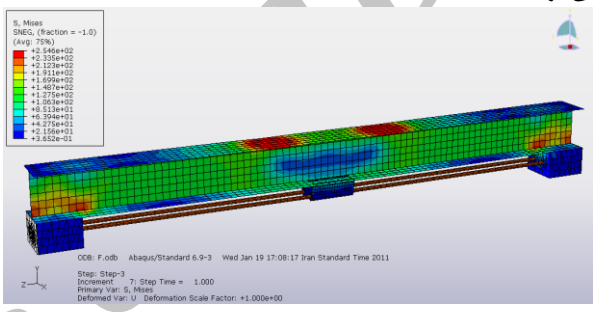
جدول۴- مقایسهٔ کلی نتایج حاصل از تحلیل نرم افزاری مدل ها با نمونه کنترل

نمونه	تنش بال پایینی تیر در وسط دهانه (N/mm^2)		کرنش بال پایینی تیر در وسط دهانه (10^{-6})		تغییرمکان (خیز) تیر در وسط دهانه (mm)	
تیر کنترل A	133	بهبود ظرفیت خمشی تیر نسبت به تیرکنترل(٪)	1167	بهبود ظرفیت خمشی تیر نسبت به تیرکنترل(٪)	8.147	بهبود ظرفیت خمشی تیر نسبت به تیرکنترل(٪)
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

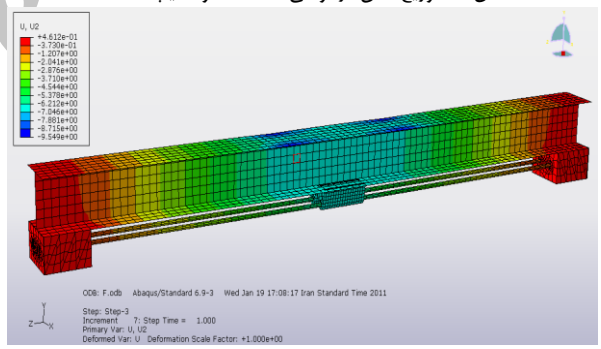
www.SID.ir

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 پیش‌تنیده تحت بررسی، نسبت به تیر فولادی در حالت عادی (تیر کنترل) برحسب درصد می‌باشد. نمونه‌ای نظیر مدل تیپ F که توسط دو رشته تاندون میلگردی، با نصب فاصله نگهدار و نیروی پیش‌تنیدگی ۱۹۶ کیلونیوتن پیش‌تنیده می‌گردد، بهترین عملکرد خمشی را در مقایسه با سایر نمونه‌های گروه به نمایش می گذارند.

نتایج تحلیل نرم‌افزاری شامل مقادیر و نحوهٔ توزیع تنش و خیز در نواحی مختلف مدل مربوط به نمونهٔ اخیر در اشکال 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- مقایسهٔ صورت گرفته بین نتایج دو نوع بررسی آزمایشگاهی و تحلیلی به روش المان محدود در تمامی مدلها حاکی از تطابق مناسب و منطقی میان آنها ست، بنابرین امکان مدلسازی نسبتاً دقیق در این نمونه‌ها مقدور بوده، لذا ضرورتی برای بررسی سایر مدلها بصورت آزمایشگاهی نمی‌باشد.

۲- خیز ها، 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 پیش‌تنیده شده با تاندونهای میلگردی بصورت دوبل، 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 نرم‌افزاری مدلها و مقایسه آنها با تیر کنترل (نمونه تیپ A) معلوم می‌گردد که با بکارگیری تکنیک پیش‌تنیدگی بصورت دو تاندون میلگردی با اعمال نیروی پیش تنیدگی ۱۹۶ کیلونیوتن 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، هرکدام 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., Investiation of fabrication and mechanical properties of internally prestressed steel I-beem. Materials and Design 2007; 28:1988-1993.

[3] Belletti B., Gasperi A., Behavior of prestressed steel beems. Jornal of Structural Engineering © ASCE; 2010.

[4] Park S., Kim T., Flexural behavior of steel I-beem prestressed with externally unbounded tendons. Jornal 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 پیش‌تنیدگی"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی سازه، دانشگاه آزاد واحد مراغه، ۱۳۸۹.

Archive of SID

www.SID.ir

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 Provinioal Department of Road Maintenance and Transportating, Tabriz, Iran

Archive of SID

Abstract:

The basic purpose of applying the prestressing technique in steel structures is section weight decrease via increaseing 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

www.SID.ir