

## مدل سازی اجزای محدود جهت تخمین ظرفیت خمشی و میزان باز توزیع لنگر در اعضای خمشی سراسری قاب های بتن مسلح تقویت شده با ورق های CFRP

فرهنگ فرحبد

استادیار و عضو هیأت علمی مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن  
farhangfarahbod@yahoo.com

### چکیده

باز توزیع لنگر از جمله ویژگی های اعضای خمشی سراسری به شمار می رود و تخمین صحیح میزان باز توزیع لنگر و ظرفیت باربری در قاب های سراسری تقویت شده با ورق های FRP به مراتب از اهمیت بیش تری برخوردار است. بر آورد واقع بینانه میزان باز توزیع لنگر، حتی می تواند به طراحی براساس آن، در قاب های سراسری تقویت شده با ورق های کامپوزیت منتهی شود. لذا مقاله حاضر، با استفاده از روش اجزای محدود، به بررسی تحلیلی ظرفیت خمشی و میزان باز توزیع لنگر قاب های سراسری تقویت شده خارجی با ورق های CFRP می پردازد. برای این منظور، ۶ نمونه آزمایشگاهی شامل ۲ نمونه کنترلی تقویت نشده و ۴ نمونه تقویت شده، با در نظر گرفتن متغیرهای میزان فولاد طولی، و مقادیر مختلف ورق CFRP در نرم افزار ANSYS مدل سازی سه بعدی و تحلیل غیر خطی شدند. نتایج حاصل از تحلیل بر مبنای این نرم افزار، انطباق نسبتاً مناسبی را با نتایج آزمایشگاهی موجود نشان داد. به علاوه توانایی مدل سازی اجزای محدود را در تخمین و بر آورد ظرفیت خمشی و همچنین میزان باز توزیع لنگر در این گونه قاب های تقویت شده به اثبات رساند.

واژه های کلیدی: ورق های FRP، باز توزیع لنگر، اعضای خمشی سراسری بتن مسلح، تحلیل غیر خطی.

## ۱- مقدمه

CFRP در این نرم افزار، تحت اثر بار استاتیکی متمرکز در وسط دهانه تیرها و بار محوری ثابت در ستون قاب‌ها، ارزیابی تحلیلی خواهند شد. صحت مدل‌سازی و نتایج تحلیلی به دست آمده، با مقایسه با نتایج تجربی موجود به اثبات خواهد رسید.

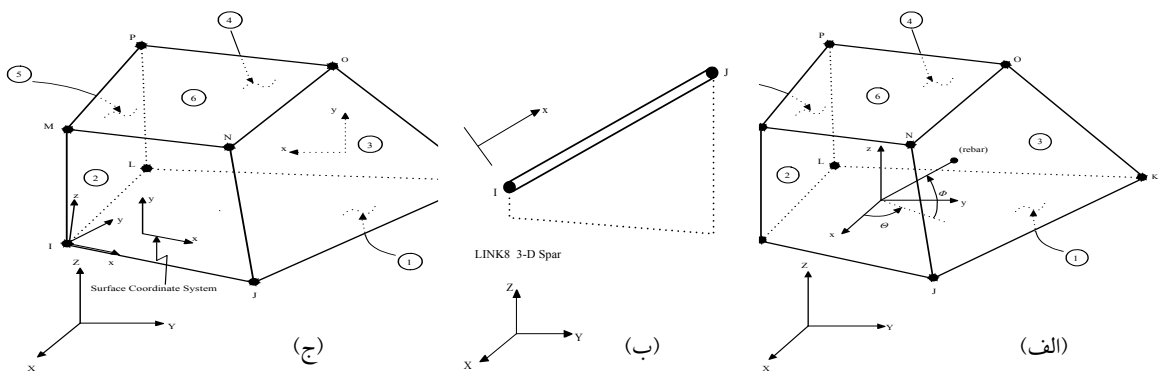
### ۲- مدل‌سازی قاب‌ها در نرم افزار

برای مدل‌سازی قطعات بتن آرمه در ANSYS از المان SOLID65 استفاده شده است. المان SOLID65، یک المان سه بعدی است که برای مدل‌سازی بتن با و یا بدون میلگرد به کار می‌رود. این المان، هشت گرهی و هر گره دارای سه درجه آزادی حرکت در سه راستای x، y و z است. روشی که در این المان برای مدل‌سازی میلگردها به کار می‌رود، در نظر گرفتن هاله‌ای (Smear) از میلگرد است. در این روش حجم میلگردها به صورت نسبتی از حجم المان معرفی می‌شود [۸]. در این تحقیق برای مدل‌سازی فولاد عرضی تیر و ستون قاب‌ها، از مدل Smear در المان SOLID65 استفاده شده است.

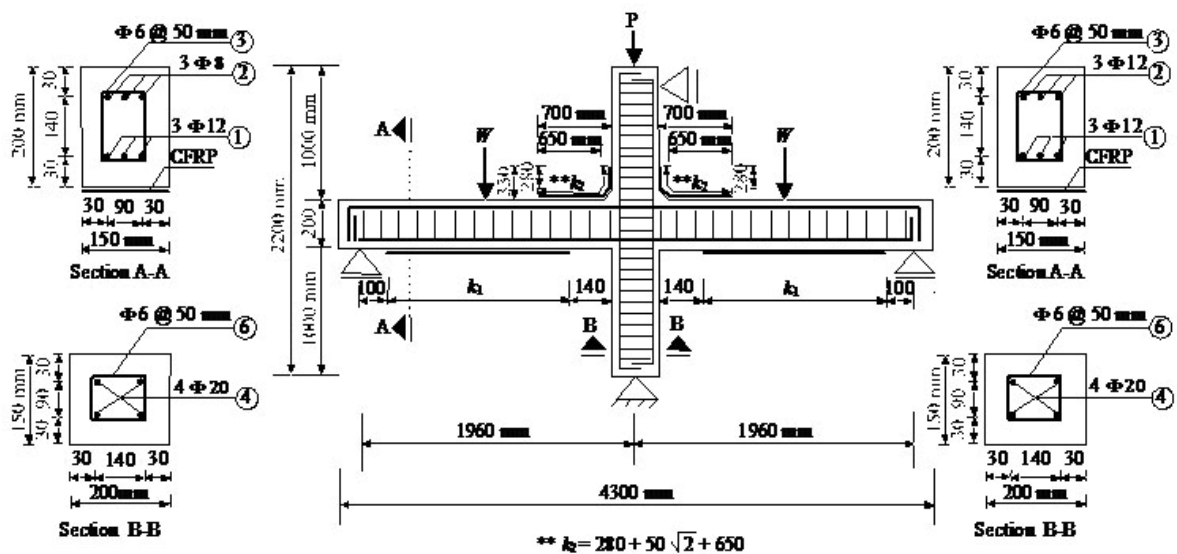
### ۳- مشخصات و ابعاد هندسی قاب‌ها

قاب سراسری شکل (۲) را در نظر بگیرید. مشخصات قاب‌ها شامل فولادگذاری، میزان و آرایش‌های مختلف ورق تقویت CFRP، در جدول (۱) مشاهده می‌شود. مطابق شکل ۲ و جدول ۱، قاب‌ها از نظر میزان و آرایش فولاد طولی به دو گروه A و B تقسیم شده‌اند. گروه A و B، هر یک شامل یک نمونه کنترلی تقویت نشده و ۲ نمونه تقویت شده با مقادیر و آرایش مختلف ورق FRP بودند. تمام نمونه‌های تقویت شده، برای جلوگیری از بروز شکست ناگهانی ناشی از جداشدگی انتهایی ورق‌های تقویت طولی، در محل انتهایی ورق تقویت و نیز در ابتدا و انتهای پخ فوقانی گوشه اتصال تیر-ستون، با دو لایه نوار U شکل CFRP مطابق شکل (۳) مهار شدند. چگونگی شبکه‌بندی قاب‌های بتن مسلح و ورق تقویت در شکل (۴) نشان داده شده است.

تاکنون مطالعات مختلف آزمایشگاهی بر روی بازتوزیع لنگر تیرهای سراسری که به صورت خارجی با ورق‌های FRP تقویت شده‌اند، انجام شده است که از آن جمله می‌توان به مطالعات الرفسانی و همکاران (۲۰۰۳) [۱]، گریس و همکاران (۲۰۰۴) [۲]، گاندور و همکاران (۲۰۰۴) [۳] و اوهلرز و همکاران [۴] اشاره کرد. تحقیقات این محققان نشان داد که در تمام تیرهای سراسری تقویت شده با ورق‌های FRP، بر خلاف افزایش ظرفیت باربری و کاهش شکل‌پذیری، بازتوزیع لنگری حدود ۱۰٪ تا ۵۰٪ به وقوع می‌پیوندد. بررسی تجربی بر روی بازتوزیع لنگر قاب‌های سراسری بتن مسلح تقویت شده با کامپوزیت‌های FRP نیز برای اولین بار در مرجع [۵] صورت گرفت و نشان داده شد که در تیرهای سراسری قاب‌های مذکور، با در نظر گرفتن متغیرهای مختلف نظیر میزان فولاد طولی، و میزان و نحوه آرایش ورق تقویت، بازتوزیع لنگری حدود ۲۰٪ تا ۵۵٪ ایجاد خواهد شد. علاوه بر تحقیقات تجربی فوق، مطالعات تحلیلی محدودی نیز برای تخمین میزان بازتوزیع لنگر در تیرهای سراسری تقویت شده با ورقه‌های FRP انجام شده است که می‌توان کارهای اوهلرز و همکاران (۲۰۰۴) [۶]، لیو و همکاران (۲۰۰۶) اشاره نمود [۷]. آنان روش صلیبیت خمشی را جهت تخمین میزان بازتوزیع لنگر در تیرهای سراسری تقویت شده، با توجه به حاکم شدن مود خرابی جدا شدگی ورق در تیر تقویت شده، توسعه دادند. هم‌چنین به بررسی پارامتری-تحلیلی میزان بازتوزیع لنگر نیز، در تیرهای تقویت شده با ورق‌های FRP پرداختند و به بازتوزیع لنگری بین ۰٪ تا ۲۰٪ دست یافتند. کم و کاستی که در این تحقیقات به چشم می‌خورد، عدم وجود بررسی تحلیلی مبتنی بر روش اجزای محدود، در زمینه تخمین ظرفیت خمشی و میزان بازتوزیع لنگر در تیر قاب‌های سراسری تقویت شده با ورقه‌های FRP می‌باشد. لذا در تحقیق حاضر، با مدل‌سازی و تحلیل غیر خطی قاب‌های آزمایشگاهی کنترلی و تقویت شده مرجع [۵] در نرم افزار ANSYS، میزان بازتوزیع لنگر و ظرفیت خمشی نهایی مقاطع بحرانی این گونه اعضاء مورد مطالعه قرار می‌گیرد. برای این منظور، ۶ نمونه آزمایشگاهی شامل ۲ نمونه کنترلی تقویت نشده و ۴ نمونه تقویت شده، با در نظر گرفتن متغیرهای میزان فولاد طولی، و مقادیر مختلف ورق



شکل ۱- شکل کلی قرارگیری گره‌ها و مشخصات المان‌های؛ الف- SOLID65؛ ب- LINK8؛ ج- SOLID45 [A]



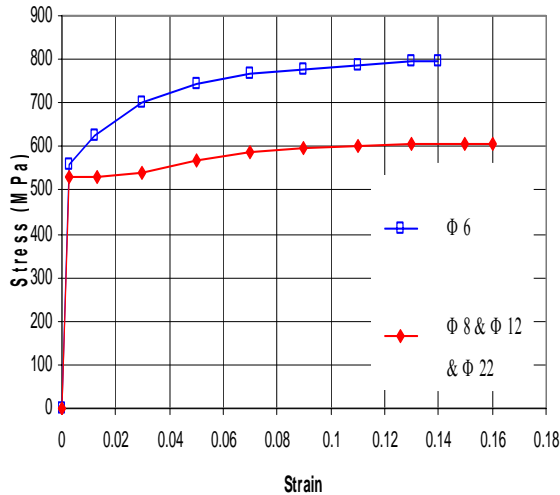
مقاطع عرضی تیر و ستون گروه B

مقطع عرضی تیر و ستون گروه A

شکل ۲- ابعاد هندسی، جزئیات فولادگذاری و تکیه‌گاهی قاب‌ها [Δ]

جدول ۱- جزئیات نحوه تقویت و فولادگذاری نمونه‌ها

فولادگذاری داخلی		اندازه ورق CFRP						نمونه	گروه
		در وسط دهانه			در تکیه‌گاه				
تحتانی	فوقانی	$k_1$ m	سطح ورق $mm^2$	تعداد لایه ورق	$k_2$ m	سطح ورق $mm^2$	تعداد لایه ورق		
۳Φ۱۲	۳Φ۱۲	-	-	-	-	-	-	A0UGZ	A
۳Φ۱۲	۳Φ۱۲	۱/۶۲	۳۳	۲	۱/۰۰	۳۳	۲	A1HGZ	
۳Φ۱۲	۳Φ۱۲	۱/۶۲	۶۶	۴	۱/۰۰	۶۶	۴	A2HGZ	
۳Φ۱۲	۳Φ۸	-	-	-	-	-	-	B0UGZ	B
۳Φ۱۲	۳Φ۸	۱/۶۲	۳۳	۲	۱/۰۰	۳۳	۲	B1HGZ	
۳Φ۱۲	۳Φ۸	۱/۶۲	۶۶	۴	۱/۰۰	۶۶	۴	B2HGZ	

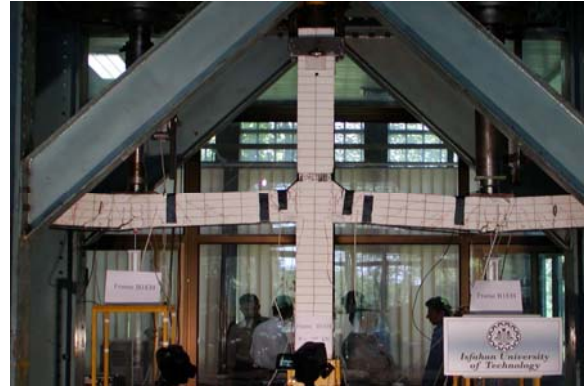


شکل ۶- نمودار تنش- کرنش میلگردهای طولی و عرضی به کار رفته در مدل سازی

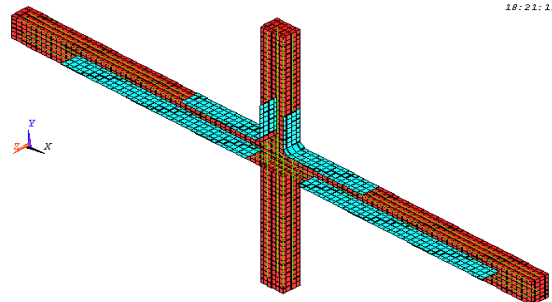
با انتخاب مقادیر مختلف برای ضریب انتقال برش در ترک‌های باز،  $\beta_f$ ، تحلیل‌های متعددی برای رسیدن به بهترین هم‌گرایی در نرم افزار انجام شد. لذا بهترین نتیجه با اتخاذ  $\beta_f = 0.96$  به دست آمد. ضریب انتقال برش در ترک‌های بسته،  $\beta_c$  نیز در تمامی تحلیل‌ها برابر 0.99 در نظر گرفته شد. منحنی تنش-کرنش معرفی شده در نرم افزار بتن و فولاد مصرفی در قاب‌ها، به ترتیب مطابق شکل‌های ۵ و ۶ است.

#### ۴-۲- ورق‌های CFRP و چسب اپوکسی

در ساخت ماده کامپوزیت CFRP، از محصول الیاف کربن SikaWrap-200C و چسب اپوکسی SikaDur-300 استفاده شده است. هر لایه الیاف، عرض ۱۵۰ mm، ضخامت ۰/۱۱ mm و لذا سطح مقطع  $16/5 \text{ mm}^2$  را داراست. مقاومت کششی و مدول الاستیسیته هر لایه الیاف کربن، به ترتیب ۳۹۰۰ MPa و ۲۳۰ GPa، و متناظرا برای چسب ۴۵ MPa و ۳/۵ GPa می‌باشد. مشخصات مکانیکی کامپوزیت CFRP به کار رفته در مدل سازی، مطابق جدول ۲ و خصوصیات ارتوتروپیک آن در جدول ۳ آورده شده است. منحنی تنش-کرنش ورق کامپوزیت CFRP و چسب اپوکسی نیز در شکل ۷ مشاهده می‌شود.



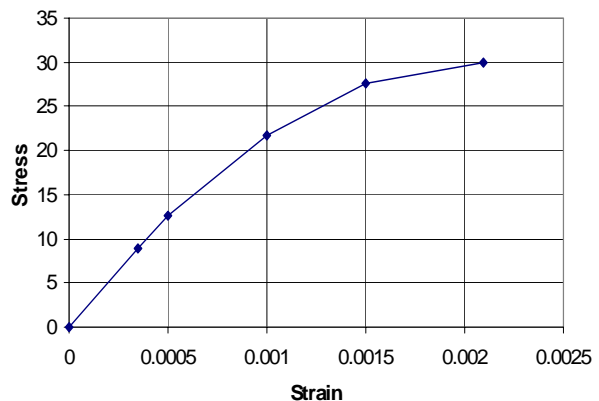
شکل ۳- نحوه استقرار و چگونگی استفاده از مهار U شکل ورق CFRP در قاب‌های مورد آزمایش



شکل ۴- نحوه المان بندی قاب‌های بتن آرمه و هم‌چنین ورق CFRP در نرم افزار ANSYS

#### ۴-۱- بتن و فولاد

بتن مورد استفاده در قاب‌ها، از نوع بتن معمولی با مقاومت فشاری نمونه‌های استوانه‌ای استاندارد 30 MPa می‌باشد. مدول گسیختگی و مدول الاستیسیته بتن، به ترتیب برابر 3.29 MPa و 25740 MPa، و ضریب پواسون بتن نیز برابر ۰/۲ در نظر گرفته شده است.



شکل ۵- نمودار تنش-کرنش بتن مورد استفاده در مدل سازی

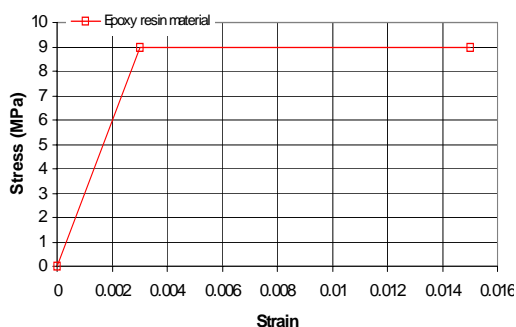
لنگر-انحناء مقاطع بحرانی، منحنی‌های باز توزیع لنگر-بار و میزان باز توزیع لنگر نهایی مقاطع بحرانی با یکدیگر مقایسه و ارزیابی خواهند شد.

جدول ۳- خصوصیات ارتوتروپیک کامپوزیت CFRP

۵۳۰۰۰	$E_x$	مدول الاستیسیته، MPa
۲۶۵۰	$E_y$	
۲۶۵۰	$E_z$	
۰/۲	$\nu_{xy}$	ضریب پواسون
۰/۳	$\nu_{yz}$	
۰/۲	$\nu_{xz}$	
۲۰۳۸	$G_{xy}$	مدول برشی، MPa
۱۰۱۹	$G_{yz}$	
۲۰۳۸	$G_{xz}$	

### ۵-۱- مقایسه نتایج تجربی و تحلیلی منحنی‌های لنگر-انحناء مقاطع بحرانی

شکل ۸ الف و ۸ ب، منحنی لنگر خمشی- انحناء را به ترتیب در وجه ستون و وسط دهانه قاب‌های تقویت نشده A0UGZ و B0UGZ نشان می‌دهد. با رجوع به این دو شکل، ملاحظه می‌شود که انطباق نسبتاً خوبی میان مقادیر لنگر خمشی وجه ستون و وسط دهانه قاب‌های کنترلی حاصل از تحلیل ANSYS



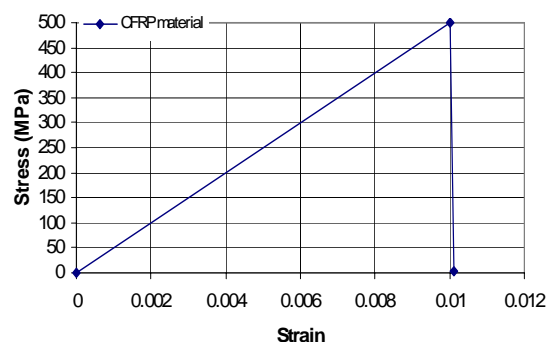
ب- چسب اپوکسی

جدول ۲- مشخصات مکانیکی کامپوزیت CFRP مورد استفاده در آزمایش و مدل ANSYS

تعداد لایه	ضخامت کل ورق mm	ضخامت چسب mm	مدول الاستیسیته کششی GPa	مقاومت کششی نهایی MPa	کرنش گسیختگی نهایی %
۲	۰/۷۴	۰/۲۶	۵۰	۵۰۰	۱/۰
۴	۱/۷۴	۰/۲۶	۵۰	۵۰۰	۱/۰

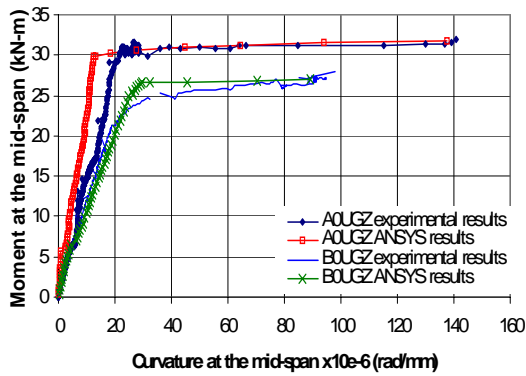
### ۵- تحلیل غیرخطی نمونه‌ها و مقایسه نتایج تحلیلی و تجربی

در این قسمت، به منظور تأیید صحت نتایج به دست آمده از تحلیل غیرخطی ANSYS، مقایسه‌ای میان نتایج حاصل از تحلیل و نتایج به دست آمده از آزمایش ۶ نمونه قاب مختلف به عمل خواهد آمد. برای این منظور، مقادیر تحلیلی و تجربی منحنی‌های با نتایج آزمایشگاهی نمایش داده است. همان‌طور که در این شکل ملاحظه می‌گردد، شیب منحنی لنگر- انحناء تا قبل از نقطه تسلیم فولاد کششی در قاب A0UGZ، کمی متفاوت با نتیجه آزمایشگاهی می‌باشد؛ ولی پس از این نقطه، تقریباً این دو منحنی بر هم منطبق شده‌اند. در مورد قاب B0UGZ نیز، میان منحنی لنگر- انحناء حاصل از تحلیل و آزمایش، تطابق مناسبی مشاهده می‌شود.

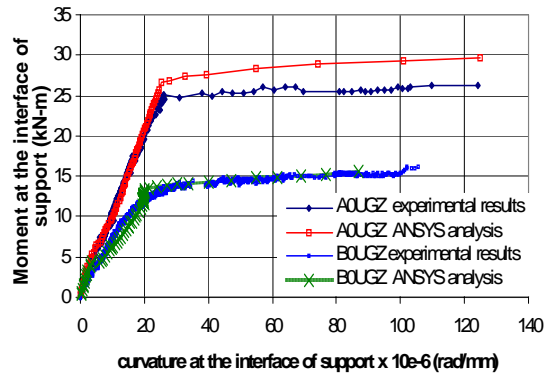


الف- ورق

شکل ۷- منحنی تنش- کرنش ورق CFRP و چسب اپوکسی در مدل‌سازی قاب‌های تقویت شده

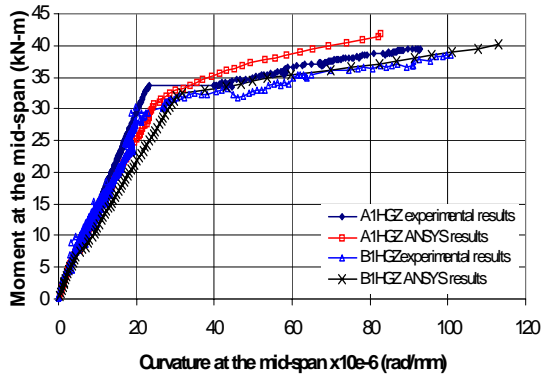


ب- وسط دهانه

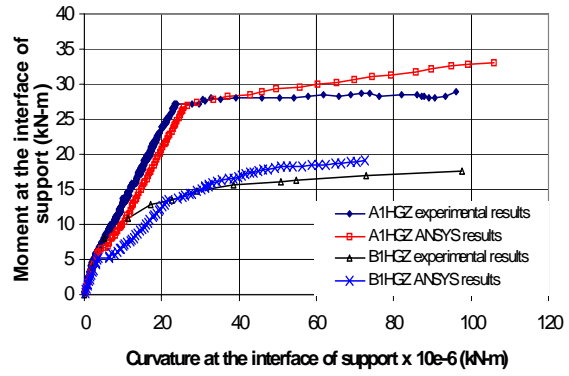


الف- وجه ستون

شکل ۸- مقایسه منحنی های لنگر- انحناء به دست آمده از تحلیل غیرخطی و نتایج آزمایش، در وجه B0UGZ و A0UGZ ستون و وسط دهانه قاب های تقویت نشده

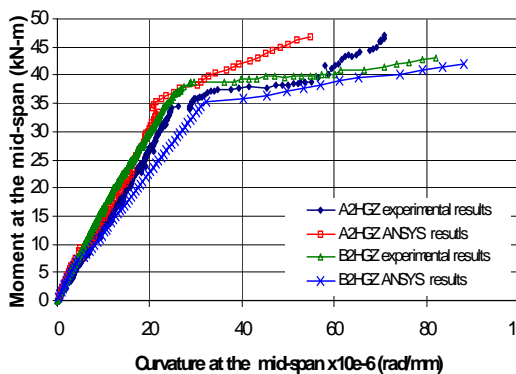


ب- وسط دهانه

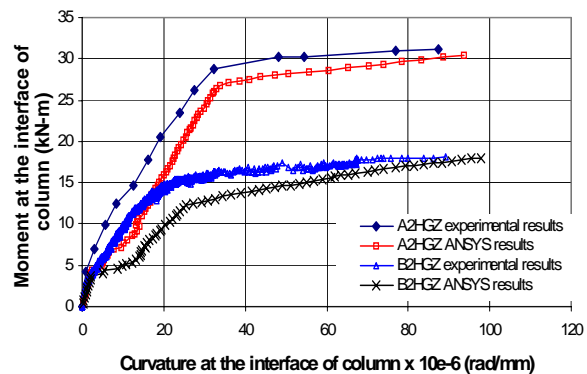


الف- وجه ستون

شکل ۹- مقایسه منحنی های لنگر- انحناء به دست آمده از تحلیل غیرخطی و نتایج آزمایش، در وجه ستون و وسط دهانه قاب های تقویت شده A1HGZ و B1HGZ



ب- وسط دهانه



الف- وجه ستون

شکل ۱۰- مقایسه منحنی های لنگر- انحناء به دست آمده از تحلیل غیرخطی و نتایج آزمایش، در وجه ستون و وسط دهانه قاب های تقویت شده A2HGZ و B2HGZ

جدول ۴- مقایسه نتایج تحلیلی و تجربی مقادیر لنگر نهایی وجه ستون و وسط دهانه قاب‌های تقویت شده

نمونه	تعداد لایه‌های ورق وسط دهانه	تعداد لایه‌های ورق مجاور ستون	$M_c^-$		$M_m^+$		اختلاف % لنگر نهایی وسط دهانه
			kN-m		kN-m		
			نتایج تحلیل ANSYS	نتایج آزمایش	نتایج تحلیل ANSYS	نتایج آزمایش	
A0UGZ	-	-	۲۷/۰۰	۳۰/۴۰	۳۱/۹۷	۳۱/۸۳	۱۲
A1HGZ	۲	۲	۲۹/۳۴	۳۱/۹۰	۳۹/۴۱	۴۱/۵۰	۹
A2HGZ	۴	۴	۳۱/۱۰	۳۱/۲۰	۴۷/۱۱	۴۶/۷۴	۰
B0UGZ	-	-	۱۶/۱۰	۱۵/۶۰	۲۷/۹۱	۲۷/۲۰	-۳
B1HGZ	۲	۲	۱۷/۶۵	۱۸/۹۰	۳۸/۶۰	۴۰/۱۰	۷
B2HGZ	۴	۴	۱۸/۱۰	۱۸/۰۲	۴۳/۰۲	۴۵/۶۷	۰

دهانه، کم‌تر از ۱۲٪ می‌باشد. بدین ترتیب صحت نتایج تحلیلی ANSYS در مدل‌سازی و ارزیابی ظرفیت خمشی قاب‌های با و بدون ورق تقویت، بار دیگر نیز به اثبات می‌رسد.

#### ۲-۵ مقایسه مقادیر تحلیلی و تجربی باز توزیع لنگر مقاطع بحرانی

درصد باز توزیع در وجه ستون،  $(M_{rd})_c$ ، و هم‌چنین درصد باز توزیع لنگر در وسط دهانه قاب‌های مختلف،  $(M_{rd})_m$  را از روابط زیر به دست آمده است:

$$\% (M_{rd})_c = \frac{(M_e)_c - (M_u)_c}{(M_e)_c} \times 100 \quad (1)$$

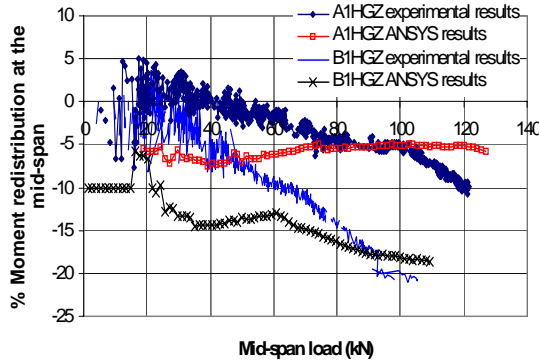
$$\% (M_{rd})_m = \frac{(M_e)_m - (M_u)_m}{(M_e)_m} \times 100 \quad (2)$$

شکل ۱۱، مقایسه میان منحنی تغییرات باز توزیع لنگر- بار اعمالی وسط دهانه حاصل از تحلیل غیرخطی و نتایج آزمایشگاهی را در قاب‌های تقویت شده A1HGZ و B1HGZ نشان می‌دهد با رجوع به شکل ۱۱-الف ملاحظه می‌شود که در گام‌های اولیه بارگذاری، اختلاف میان مقادیر تحلیلی و آزمایشگاهی در وجه ستون هر دو قاب A1HGZ و B1HGZ، زیاد می‌باشد. ولی در قاب B1HGZ، برای بارهای بزرگ‌تر از 60 KN، این اختلاف به تدریج کم شده است. در قاب A1HGZ نیز، برای بار حدود 75

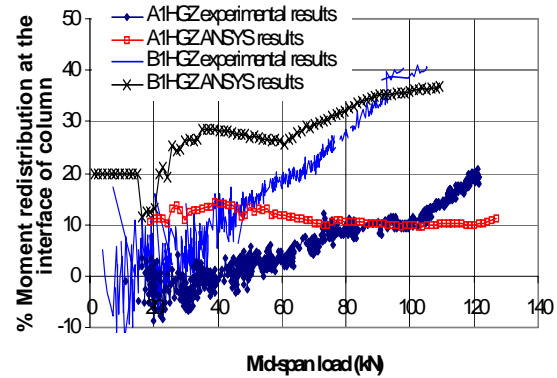
شکل ۹- الف و ب، منحنی‌های لنگر- انحناء به دست آمده از تحلیل غیرخطی و نتایج تجربی را به ترتیب در وجه ستون و وسط دهانه قاب‌های A1HGZ و B1HGZ نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌گردد، اگر چه در برخی از موارد مانند قاب B1HGZ در ناحیه وجه ستون یا قاب A1HGZ در ناحیه وسط دهانه، مقادیر انحنای به دست آمده از تحلیل ANSYS، کمی با مقدار نتیجه شده از آزمایش تفاوت دارد، ولی مقادیر لنگر خمشی بر پایه نتایج تحلیلی و تجربی، انطباق نسبتاً مناسبی را در هر دو ناحیه وجه ستون و وسط دهانه قاب‌های تقویت شده فوق نشان می‌دهد. به همین ترتیب شکل ۱۰- الف و ب، منحنی لنگر- انحنای قاب‌های تقویت شده A2HGZ و B2HGZ، همان‌گونه که در این شکل‌ها ملاحظه می‌گردد، میان نتایج تحلیلی و تجربی مقادیر لنگر و انحنای، در هر دو ناحیه وجه ستون و وسط دهانه، تطبیق نسبتاً مناسبی حاصل شده است.

جدول ۴، مقایسه‌ای از مقادیر لنگر خمشی نهایی قاب‌های با و بدون ورق تقویت را در ناحیه وجه ستون و وسط دهانه که براساس آزمایش و تحلیل غیرخطی به دست آمده است، نشان می‌دهد.  $M_c^-$  و  $M_m^+$  در این جدول، به ترتیب لنگر خمشی منفی وجه ستون و لنگر خمشی مثبت ناحیه وسط دهانه قاب‌ها می‌باشند. همان‌طور که در این جدول ملاحظه می‌گردد، اختلاف میان مقادیر تحلیلی و تجربی هر دو ناحیه وجه ستون و وسط

شکل ۱۱-ب نیز در منحنی باز توزیع لنگر-بار وسط دهانه قاب های A1HGZ و B1HGZ مشهود است. بارهای بزرگ تر از 107 kN، مجدداً میان مقادیر باز توزیع لنگر تحلیلی و تجربی اختلاف به وجود آمده است. همین روند مطابق

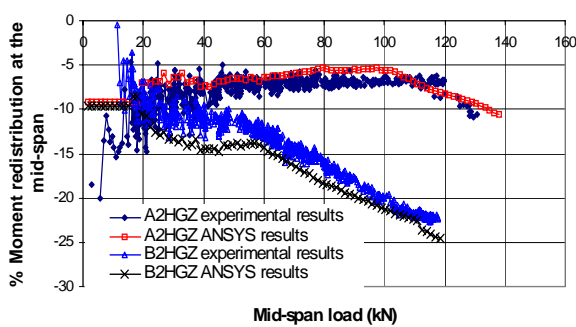


ب- وسط دهانه

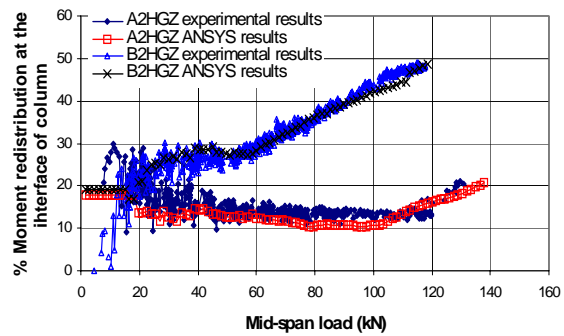


الف- وجه ستون

شکل ۱۱- مقایسه منحنی های باز توزیع لنگر-بار، به دست آمده از تحلیل غیرخطی و نتایج آزمایش، در وجه ستون و وسط دهانه قاب های تقویت شده A1HGZ و B1HGZ



ب- وسط دهانه



الف- وجه ستون

شکل ۱۲- مقایسه مقادیر تحلیلی و تجربی منحنی های باز توزیع لنگر-بار، در وجه ستون و وسط دهانه قاب های تقویت شده A2HGZ و B2HGZ

جدول ۵- مقایسه نتایج تحلیلی و تجربی مقادیر باز توزیع لنگر در وجه ستون و وسط دهانه قاب های مختلف

/باز توزیع لنگر در وسط دهانه		/باز توزیع لنگر در وجه ستون		تعداد لایه های ورق مجاور ستون	تعداد لایه های ورق وسط دهانه	نمونه
نتایج تحلیل	نتایج آزمایش	نتایج تحلیل	نتایج آزمایش			
-۴/۵	-۷/۵	۱۰/۰	۱۵/۰	-	-	A0UGZ
-۵/۸	-۹/۹	۱۱/۳	۱۹/۳	۴	۲	A1HGZ
-۱۰/۶	-۱۰/۵	۲۰/۶	۲۱/۲	۴	۴	A2HGZ
-۱۷/۶	-۱۶/۲	۳۳/۲	۳۱/۵	-	-	B0UGZ
-۱۸/۶	-۲۰/۷	۳۶/۷	۴۰/۲	۲	۲	B1HGZ
-۲۲/۲	-۲۴/۶	۴۸/۶	۴۸/۰	۲	۴	B2HGZ



- [4]. Ohlers, D. J., Ju, G., Liu, I. S. T., and Seracino, R., 2004, "Moment Redistribution in Continuous Plated RC Flexural Members. Part 1: Neutral Axis Depth Approach and Tests," *Engineering Structures*, Vol. 26, No. 14, pp. 2197-2207, 2004.
- [5]. Mostofinejad, D., and Farahbod, F., "Moment Redistribution Study of Continuous Beams in Reinforced Concrete Frames Strengthened with CFRP Composite Sheets," *The Third National congress on civil Engineering (3NCCE)*, Tabriz University/Iran, May 2007
- [6]. Ohlers, D. J., Liu, I. S. T., Ju, G., and Seracino, R., "Moment Redistribution in Continuous Plated RC Flexural Members. Part 2: Flexural Rigidity Approach," *Engineering Structures*, Vol. 26, No. 14, pp. 2209-2218, 2004.
- [7]. Liu, I. S. T., Oehlers, D. J., Seracino, R., and Ju, G., "Moment Redistribution Parametric Study of CFRP, GFRP and Steel Surface Plated RC Beams and Slabs," *Construction and Building Materials*, Elsevier, Vol. 20, No. 1, pp. 59-70, 2006.
- [8]. ANSYS User's Manual, 12th Ed., SAS IP, Inc., 2005.
- [9]. Task Group 9.3 FRP Reinforcement for Concrete Structures, "Externally Bonded FRP Reinforcement for RC Structures, Design and Use of Externally Bonded Fiber Reinforced Polymer Reinforcement (FRP EBR) for Reinforced Concrete Structures," *fib CEB-FIP Bulletin 14*, Switzerland, 2001.

شکل ۱۲، مقایسه میان مقادیر تحلیلی و تجربی منحنی تغییرات بازتوزیع لنگر-بار را در وجه ستون و وسط دهانه قاب‌های تقویت شده A2HGZ و B2HGZ نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، انطباق نسبتاً مناسبی در مقادیر بازتوزیع لنگر هر دو ناحیه از قاب‌های مذکور حاصل شده است.

## ۶- نتیجه‌گیری

در این تحقیق با استفاده از روش اجزای محدود، به بررسی تحلیلی و تعیین ظرفیت خمشی و میزان بازتوزیع لنگر در قاب‌های سراسری بتن مسلح تقویت نشده و تقویت شده با کامپوزیت‌های CFRP پرداخته شد. بررسی مزبور نیز مشابه با نتایج مرجع [۵]، وقوع بازتوزیع لنگر در قاب‌های سراسری تقویت شده را، بر خلاف آن چه که آیین‌نامه‌های متداول مقاوم‌سازی با ورق‌های FRP در خصوص عدم مجاز بودن استفاده از بازتوزیع لنگر در این گونه قاب‌های تقویت شده بیان می‌نمایند [۹]، نشان داد. به علاوه نتایج حاصل از مدل اجزای محدود در این تحقیق، نشان‌دهنده تخمین نسبتاً مطلوب ظرفیت خمشی و میزان بازتوزیع لنگر در قاب‌های بتن مسلح تقویت شده با کامپوزیت‌های FRP در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی می‌باشد، به گونه‌ای که میزان حداکثر اختلاف میان نتایج تحلیلی و تجربی در تخمین میزان ظرفیت خمشی مقاطع تقویت حدود ۹٪ است.

## ۷- مراجع

- [1]. El-Refaie, S. A., Ashour, A. F., and Garrity, S. W., "Sagging and Hogging Strengthening of Continuous Reinforced Concrete Beams Using Carbon Fiber-Reinforced Polymer Sheets," *ACI Structural Journal*, Vol. 100, No. 4, July. Aug., pp. 446-453, 2003.
- [2]. Grace, N. F., Ragheb, W. F., and Abdel-Sayed, G., "Strengthening of Cantilever and Continuous Beams Using New Triaxially Braided Ductile Fabric," *ACI Structural Journal*, Vol. 101, No. 2, Mar. Apr., pp. 237-244, 2004.
- [3]. El-Ghandour, A. A., Abdelrahman, A. A., Nasr, E. A., and Aly, H. A., "Moment Redistribution in RC Continuous Beams Strengthened in Flexure by CFRP Laminates," *The Second International Conference on FRP Composites in Civil Engineering*, Adelaide, Australia, pp. 227-235, Dec. 2004.