



تقویت برشی تیرهای عمیق بتن سبک مسلح با استفاده از الیاف CFRP

آزاده السادات اصغری، مرتضی حسینعلی بیگی، بهرام نوائی نیا،

ایمان مسگریان، محمد تقی کاظمی

1- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

2 و 3- استادیار دانشگاه صنعتی بابل

4- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه دانشگاه صنعتی شریف پردیس کیش

5- دانشیار دانشگاه صنعتی شریف

azadeh.alsadat@yahoo.com

خلاصه

افزایش آرماتورهای برشی (تقویت داخلی) بیش از یک مقدار مشخص نمی تواند باعث افزایش ظرفیت برشی و مقاومت نهایی تیر عمیق بتنی گردد. به همین دلیل تقویت خارجی جان چنین تیرهایی به منظور افزایش ظرفیت برشی به کمک الیاف پلیمری مسلح شده موضوع تحقیقات بسیاری را شامل می گردد. در تحقیق حاضر، تقویت برشی تیرهای عمیق ضعیف در برش با استفاده از الیاف CFRP و تاثیر آنها بر جان این تیرها به کمک مدل های آزمایشگاهی مورد بررسی قرار می گیرد. بدین منظور هشت تیر عمیق بر روی تکیه گاه ساده تحت دو بار متمرکز یکسان و به فاصله مساوی از تکیه گاهها مورد آزمایش قرار گرفته که در تمامی آنها مقدار آرماتور داخلی مشابه، ولی نسبت دهانه برشی (a) به عمق تیر (D) متفاوت می باشند. از این میان دو تیر به عنوان نمونه کنترلی شاهد (بدون تقویت) و بقیه نمونه ها نیز در دهانه برشی تیر با الیاف CFRP تقویت شدند. برای کلیه نمونه ها بار به صورت تدریجی اعمال و تغییر مکان وسط دهانه و کرنش ها در ارتفاع تیر اندازه گیری گردیدند. نتایج نشان می دهد که استفاده از الیاف CFRP، بار نهایی تیر را به طور قابل ملاحظه ای افزایش می دهد.

کلمات کلیدی: تیر عمیق، بتن سبک، تقویت برشی، الیاف CFRP

1- مقدمه

تیرهای عمیق به دلیل کاربرد وسیع در مهندسی عمران از جمله ساختمانهای بلند مرتبه، مخازن، سیلوا مستطیلی، دیافراگم های کف، دیوارهای برشی، دالهای تاشده و سازه های دریایی مورد توجه محققان می باشند [1]. به دلیل رفتار پیچیده این تیرها تعریف دقیقی که مورد تایید همه مراجع باشد وجود ندارد. ولی اکثر مراجع نسبت دهانه (L) به عمق (D) تیر کمتر از 5 را به عنوان تیر عمیق می شناسند. به طوری که آیین نامه های اروپایی نسبت L/D کمتر از 2,5 و آیین نامه آمریکا این نسبت را 4 و آیین نامه کانادا آن را تا 5 در نظر می گیرند.

به دلیل پیشرفتهایی که در ساخت بتن صورت پذیرفته، بتن سبک به دلیل اقتصادی بودن در حال حاضر جایگاه ویژه ای را پیدا نموده است. برای یک مقاومت فشاری ثابت بتن سبک در مقایسه با بتن معمولی، کاهش چگالی تا 1/3 مشاهده شده است که این موضوع باعث کاهش بار مرده و به تبع آن بار زلزله در ساختمانهای بزرگ می شود و هزینه ساخت ساختمان را در حدود 10 تا 20 درصد در مقایسه با سازه با بتن معمولی کاهش می دهد [2,3].

الیاف پلیمری نیز از جمله مصالحی می باشند که در سالهای اخیر به منظور تقویت سازه ها به کار برده می شوند. FRP (Fiber Reinforced Polymer) شامل الیاف، رزین های تشکیل دهنده ورق های کامپوزیت، رزین های به کار برده شده جهت اتصال ورق ها به بتن زیرین و روکش های حفاظتی می باشد [4]. ورق های کامپوزیت شامل الیاف پیوسته کربن، شیشه و یا آرامید می باشد که به منظور پیوستگی و یکپارچگی درون رزین ماتریس قرار گرفته اند. FRP نقش مهمی در تقویت سازه های ضعیف موجود ایفا می کند و دارای خواص منحصر به فردی چون مقاومت کششی بالا، وزن کم و مقاومت مطلوب در برابر خوردگی می باشد. تاثیر استفاده از ورق های FRP در تقویت برشی تیرهای بتن مسلح معمولی (کم عمق) به طور کامل گسترده ای توسط محققین مورد بررسی قرار گرفته است که نتایج این تحقیقات بیانگر تاثیر چشمگیر کاربرد ورق های FRP در افزایش مقاومت برشی بوده است [5-8]. با وجود تحقیقات گسترده در زمینه تیرهای معمولی از نظر عمق، در مورد تیرهای عمیق بتنی فعالیت های تحقیقاتی کمی انجام شده است، ولی آنچه مسلم است تیر عمیق معمولاً در برش شکست می شود و در چنین حالتی است که می توان جان تیر عمیق را توسط FRP تقویت کرد.

در این خصوص نظریات مختلفی در ارتباط با اثر تقویت جان توسط FRP در تیرهای عمیق که عمدتاً حاصل از مطالعات آزمایشگاهی می باشد. برخی محققین همانند [9] paiva و یا نظریات CIRIA [10]، معتقد بر عدم تاثیر ورق FRP بر افزایش مقاومت تیر عمیق هستند ولی گروهی دیگر از محققین تاثیر FRP بر افزایش مقاومت نهایی تیر عمیق را بیش از 30% اعلام کرده اند [11، 12، 13، 14].

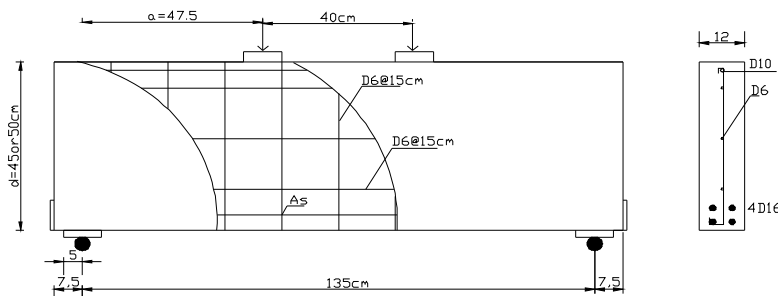
در مطالعه حاضر، به بررسی اثر امتداد الیاف FRP و نوع الیاف FRP بر میزان تقویت تیرهای عمیق بتن سبک مسلح پرداخته شده و اثر الیاف CFRP بر تغییر مکان تیر، میزان افزایش ظرفیت برشی و در نهایت مقاومت نهایی تیر تقویت شده بررسی می گردد.

2- روش تحقیق

2-1- جزییات تیرهای مورد آزمایش

هشت تیر عمیق از بتن دانه سبک لیکا شامل 2 سری تیر با نسبت دهانه به عمق موثر 2,7 و 3 ساخته شدند. تیر عمیق ساخته شده در کلیه ابعاد تیر به جز ارتفاع یکسان هستند. تمام تیرها دارای طول 1500mm و عرض 120mm بوده اما تیرهای سری اول 500mm و تیرهای سری دوم 450mm ارتفاع دارند. همانطور که در شکل (1) نشان داده شده، آرماتورهای کششی شامل میلگردهای آجدار 4T16 با مقاومت تسلیم 400 MPa می باشند. این میلگردها در دو لایه قرار داده شده و برای ایجاد مهار لازم، میلگردها را در انتها از سوراخهای یک صفحه سر به ضخامت 10mm عبور داده و دور تا دور میلگرد به صفحه سر از طرف بیرون جوش داده می شود. آرماتورهای برشی یک شبکه با بازشوهای مربعی به ابعاد 150mm و قطر 6mm است. این مقدار آرماتور برشی حداقل مقدار مورد نیاز در آیین نامه آبا و ACI318-99 را تامین نمی نماید لذا تمام تیرهای مورد آزمایش در برش دارای ضعف سازه ای هستند. به منظور جلوگیری از لهیدگی بتن از صفحه فولادی به ضخامت 20mm و طول 100mm در نقاط بارگذاری و تکیه گاهی در تمام عرض تیر استفاده می شود. آرایش میله گردهای اصلی، شبکه افقی و قائم در تیرهای سری اول و دوم در شکل (1) آمده است. برای نامگذاری تیرها، حروف a و b به ترتیب نشان دهنده سری اول و دوم تیر و حروف V و D به ترتیب نشان دهنده جهت قائم و زاویه 45 درجه الیاف نسبت به محور طولی عضو می باشند.

شکل 1- نمونه ای از آرایش آرماتورهای اصلی، شبکه افقی و قائم در تیرهای سری اول و دوم



2-2- خواص مصالح

در این پژوهش از سیمان پرتلند نوع 2 با وزن مخصوص 3150 کیلوگرم بر متر مکعب، میکروسیلیس، تولید کارخانجات فروسیلیس ایران با وزن مخصوص 2200 کیلوگرم بر متر مکعب و فوق روان کننده مورد استفاده با نام تجاری فسروک (Phosroc) بوده است. ماسه مصرفی از نوع رودخانه ای با مدول نرمی 4/1 و ارزش ماسه ای 96 می باشد. جهت سبک سازی از دانه های سبک لیکا به اندازه 0-3mm که به صورت صنعتی تهیه می شود استفاده



گردیده است. در جدول (1) طرح اختلاط تیرهای ساخته شده آورده شده است که مقاومت فشاری (استوانه ای) 28 روزه چنین طرح اختلاطی در حدود 300MPa حاصل گردیده است.

جدول 1- طرح اختلاط بتن سبک

وزن مخصوص Kg/m ³	اندازه لیکا mm	درصد آب به سیمان	لیکا (kg)	ماسه (kg)	آب (kg)	فوق روان کننده (kg)	میکروسیلیس (kg)	سیمان (kg)
1800	0-4	0.42	267.7	803.17	199.5	7.125	47.5	475

لامینیت های CFRP به عرض 50mm پس از آماده سازی سطح به جان تیرها در منطقه دهانه برشی متصل گردید. خواص لامینیت ها و ورقهای CFRP، طبق گزارش کارخانه سازنده، در جدول (2) آورده شده است.

جدول 2- خواص CFRP مورد استفاده

کرنش نهایی (%)	مدول الاستیسیته (GPa)	مقاومت نهایی (MPa)	ضخامت (mm)
1.8	165	3000	1.2
1.16	240	4000	0.176

چسب استفاده شده برای چسباندن الیاف CFRP به سطح بتن، رزین اپوکسی دو جزئی بوده که خواص آن در جدول (3) نشان داده شده است.

جدول 3- خواص رزین اپوکسی و سخت کننده

سخت کننده	رزین	خصوصیات
0,98	1,15	چگالی در 25 (g/cm ³)
2,0	1,8	وزن مخصوص
300-400	450-550	مقاومت خمشی (Kg/cm ²)

2-3- نحوه تقویت

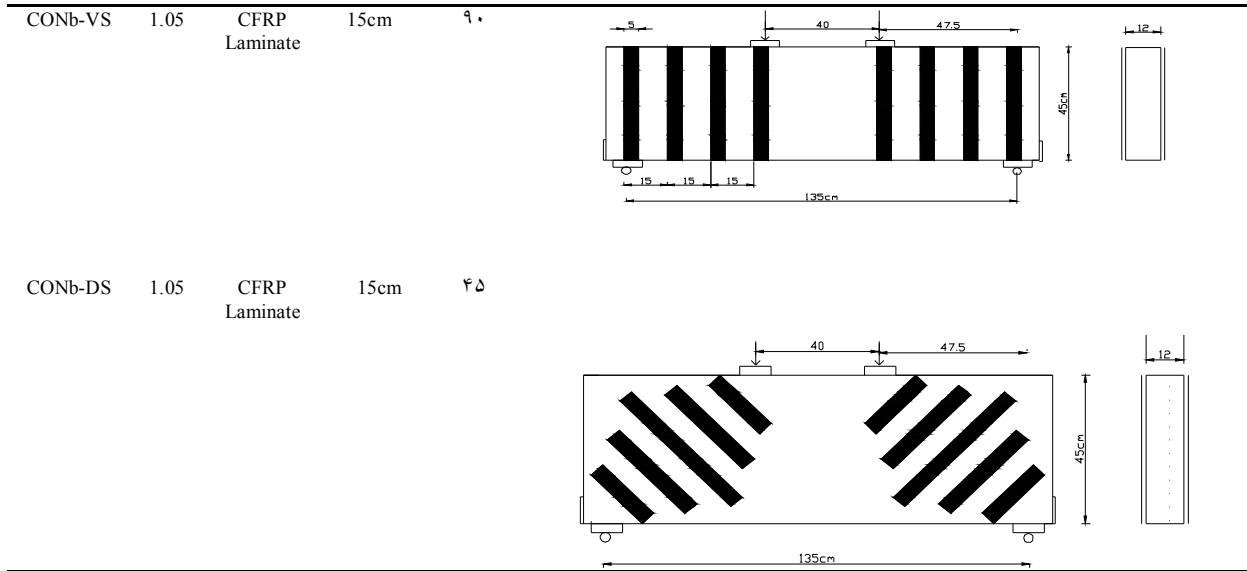
تیرهای REF-a و REF-b به عنوان تیر کنترل، بدون هیچ نوع تقویت خارجی مورد آزمایش قرار گرفتند. 6 تیر باقیمانده نیز در دهانه برشی تیر در ناحیه ای بین محل اعمال بار و تکیه گاه تقویت شدند. جزئیات تقویت برشی تیرها در جدول (4) آورده شده است. در تیر CONa-DS لامینیت های



CFRP به طول 25cm ، 35cm و 50cm و در تیر CONb-DS به طول 20cm ، 35cm و 50cm به صورت متقارن با زاویه 45 درجه نسبت به محور طولی تیر در دهانه های برشی متصل شدند.

جدول 4- جزئیات تقویت برشی تیرها

	a/D	مصالح تقویتی	فاصله تقویتی	زاویه الیاف	روش تقویت
REF-a	0.95	-	-	-	
REF-b	1.05	-	-	-	
CONa-VW	0.95	CFRP Sheet	-	۹۰	
CONa-VS	0.95	CFRP Laminate	15cm	۹۰	
CONa-DS	0.95	CFRP Laminate	15cm	۴۵	
CONb-VW	1.05	CFRP Sheet	-	۹۰	



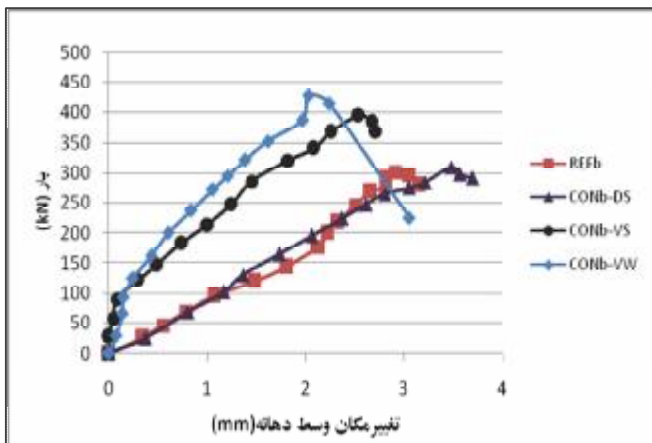
4-2- روش آزمایش

کلیه نمونه ها توسط یک جک هیدرولیکی با ظرفیتی معادل 50 تن تحت بارگذاری چهار نقطه ای متقارن، قرار گرفته و بارگذاری نمونه ها از بالا و به صورت استاتیکی صورت پذیرفت. تکیه گاه تیرها به صورت ساده و از انتهای هر تیر به فاصله 75mm واقع شدند. تغییر مکان وسط نمونه ها توسط یک تغییر شکل سنج الکتریکی (LVDT) اندازه گیری و اطلاعات مربوط به بار و تغییر مکان نمونه ها توسط یک دستگاه کامپیوتر ثبت گردید.

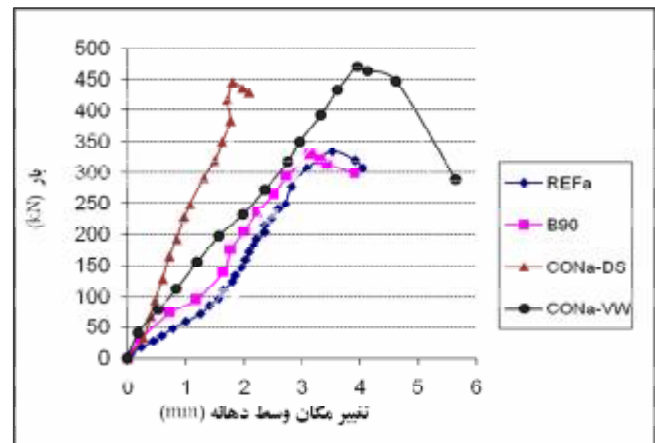
3- بررسی نتایج آزمایشگاهی

1-3- رفتار بار - تغییر مکان

برای بررسی سختی و تغییر مکان تیرها، منحنی بار- تغییر مکان وسط دهانه مورد بررسی قرار گرفته است. این منحنی ها در شکل های (1) و (2) نشان داده شده است.



شکل 2: منحنی بار - تغییر مکان وسط دهانه تیرهای سری b



شکل 1: منحنی بار - تغییر مکان وسط دهانه تیرهای سری a



در شکلهای (1) و (2) ملاحظه می شود که منحنی بار- تغییر مکان تیرها تا بار گسیختگی تقریباً حالا خطی داشته، که این امر نشان دهنده آن است که میلگردهای خمشی جاری نشده اند. همچنین همانطور که انتظار می رفت تقویت با FRP باعث افزایش سختی تیرها شده است. در سری a بیشترین سختی مربوط به تیر CONa-DS و در سری b مربوط به تیر CONb-VW می باشد.

3-2- مقاومت نهایی و مود گسیختگی

مقادیر بار نهایی و مود گسیختگی نمونه ها در جدول (5) و نمونه تیرهای گسیخته شده در اثر بار در شکل (3) ارائه شده است. همانطور که انتظار می رفت در تیرهای مرجع REFa و REFb ترکهای برشی در حد واصل بین تکیه گاه و نقطه بارگذاری باعث گسیختگی شده است. در حد فاصل بین تکیه گاه و نقطه بارگذاری موارد زیر قابل مشاهده است:

الف) تیرهای تقویت شده با ورقهای CFRP به علت ترکهای برشی در حد واصل بین تکیه گاه و نقطه بارگذاری گسیخته شده است شکل (3b) و (3f). در گسیختگی، جدا شدن ورقهای CFRP از سطح بتن و گسیختگی CFRP قابل توجه است.

ب) تمام تیرهای تقویت شده با لامینیت های CFRP به علت ترکهای برشی در حد واصل بین تکیه گاه و نقطه بارگذاری و جدا شدن انتهای لامینیت ها از سطح بتن گسیخته شده است شکل (3c) و (3d) و (3g) و (3h). مشاهده دقیق تر نشان می دهد که جدا شدن لامینیت های CFRP به علت پوسته پوسته شدن بتن و نه به علت گسیختگی چسب بین بتن و لامینیت CFRP می باشد (شکل 4). در تیر B90 تقویت با لامینیت های CFRP به دلیل اینکه ترکها از انتهای نوارها عبور کردند در افزایش ظرفیت برشی تیر بی تاثیر بوده است.

جدول 5- نتایج آزمایشگاهی

تیر	بار نهایی (KN)	سهم CFRP (KN)	افزایش بار نهایی پس از تقویت (%)	مود گسیختگی
REF-a	334	-	-	گسیختگی برشی
CONa-VW	470	136	40	گسیختگی ورق CFRP + جدا شدن ورق
CONa-VS	330	-	-	گسیختگی برشی + جدا شدن لامینیت CFRP از سطح بتن
CONa-DS	460	126	38	گسیختگی برشی + جدا شدن لامینیت CFRP از سطح بتن
REF-b	302	-	-	گسیختگی برشی
CONb-VW	428	126	42	گسیختگی ورق CFRP + جدا شدن ورق
CONb-VS	461	159	53	گسیختگی برشی + جدا شدن لامینیت CFRP از سطح بتن
CONb-DS	361	59	20	گسیختگی برشی + جدا شدن لامینیت CFRP از سطح بتن

شکل 3-



گسیختگی نمونه ها



REF-a نمونه (a)



REF-b نمونه (e)



CONa-VW نمونه (b)



CONb-VW نمونه (f)



B90-a نمونه (c)



CONb-VS نمونه (g)



CONa-DS نمونه (d)



CONb-DS نمونه (h)

شکل 4- جدا شدن لامینیت از سطح بتن





4- نتایج

- با توجه به آزمایشهای انجام شده و بحثهای صورت پذیرفته به نتایج کلی زیر می توان دست یافت:
- 1- اولین ترکهای ایجاد شده در تیرهای عمیق ساخته شده از بتن سبک تقویت شده با الیاف CFRP، ترکهای خمشی در وسط دهانه می باشند که در باری حدود 25-30 درصد بار گسیختگی به وجود می آیند و در بارهای بالاتر ترکهای برشی در حد واصل بین نقطه بارگذاری و تکیه گاه به صورت مایل در باری حدود 30-40 درصد بار گسیختگی ایجاد می شوند.
 - 2- در هنگام استفاده از الیاف CFRP برای تیرهای عمیق ضعیف در برش، ترکهای اولیه در بارهای بیشتری نسبت به تیر کنترل تشکیل می شوند. این موضوع نشان می دهد که استفاده از الیاف CFRP در تقویت برشی سازه ها موثر است.
 - 3- چسباندن الیاف CFRP به سطوح جانبی تیر سبب افزایش ظرفیت برشی تیر عمیق در حدود 20-53% می شود. در این حالت عامل شکست تیر عموماً جداشدن الیاف پلیمری از سطوح جانبی تیر عمیق بتن مسلح می باشد.
 - 4- سهم برشی CFRP نمونه تقویت شده با لامینیت 45 درجه با نسبت $a/D=0.95$ در حدود $1/13$ برابر بزرگتر از نمونه تقویت شده با لامینیت 45 درجه با $a/D=1.08$ می باشد.
 - 5- سهم برشی CFRP نمونه تقویت شده با ورقهای CFRP با نسبت $a/D=0.95$ در حدود 8 درصد بیشتر از نمونه تقویت شده با ورقهای CFRP با نسبت $a/D=1.08$ می باشد.

مراجع

- 1- Subedi, N.K., Vardy, A.E. and khota, N. (1986), "Reinforced concrete deep beams- some test results". Magazine of concrete Research, vol. 38, No. 137, December pp. 206-219.
- 2- T.Y. LO, H.Z. Cui, Z.G. Li, (2003), "Influence of aggregate Pre-Wetting and fly ash on mechanical properties of lightweight concrete", Waste management.
- 3- Zhang, M.H. and Gjorv, O.E. (1991), "Mechanical properties of High-Strength lightweight concrete, ACI Materials journal 88(3), pp. 240-247.
- 4- ACI committee 440 (2004), Guide for the Design and construction of Externally bonded FRP Systems for strengthening concrete structures (ACI 440.2R-02), MCP 2004.
- 5- Yoon KML. (2000), "Strengthening of concrete beams with fiber-reinforced polymer (FRP) mesh. Undergraduate thesis. Department of Civil Engineering, National University of Singapore.
- 6- Adhikary B. (2004), "Behavior of concrete beams strengthened in shear with carbon-fiber sheet". ASCE J compose construct; 8(3): 258-64.
- 7- Zhang Z, Hsu C-TT. (2005), "Shear strengthening of reinforced concrete beams using carbon-fiber-reinforced polymer laminates". J. Compos Construct; 9(2): 158-69.
- 8- Mosallam, A. and Banerjee S. (2007), "Shear enhancement of reinforced concrete beams strengthened with FRP composite laminate". 1359-8368/\$-see front matter_2007 Elsevier Ltd. All right reserved. Doil: 10.1016/j.compositesb.2006.10.002
- 9- de Paiva HAR, Siess CP. (1965), "Strength and behavior of deep beam in shear. J Struct Div, ASCE; 91(ST5): 19-41.
- 10- CIRIA. CIRIA Guide 2 (1977): The design of deep beams in reinforced concrete. Construction Industry Research and Information Association, Ove Arup and Partners, London.
- 11- Kong FK, Robins PJ, Kirby DP, Short DR. (1972), "Deep beams with inclined web reinforcement. ACI J Proc; 69(3): 172-6.
- 12- Kong FK, Robins PJ, Cole PJ. (1970), "Web reinforcement effects on deep beams". ACI J Proc; 67(12): 1010-7.
- 13- Smith KN, and Vantsiotis AS. (1994), "Shear strength of deep beams". ACI Struct, J; 91(5): 58
- 14- Islam M.R., Mansur M.A. and Maalej M. (2004), "Shear strengthening of RC deep beams using externally bonded FRP systems". 0958-9465/\$-see front matter_2004 published by Elsevier Ltd. doi: 10.1016/j.cemconcomp.2004.04.002