

## کامپوزیتهای پایه پلیمری (FRP) و استحکام بخشی سازه های چوبی غیر مسلح

روح اله رحیمی - عضو هیئت علمی دانشکده معماری و شهرسازی دانشگاه خلیج فارس

[r.rahimi@pgu.ac.ir](mailto:r.rahimi@pgu.ac.ir)E.mail:

contact:09177703299

### چکیده

آزمایشات مکانیکی روی چوبهای تقویت شده با استفاده از یک لایه نازک از FRP نشان می دهد که این روش استحکام بخشی تاثیر بسیار خوبی بر روی استحکام خمشی می گذارد . اگر از الیاف کربن که بهترین گزینه است برای تقویت استفاده شود ، استحکام خمشی تا ۹۰٪ نسبت به حالتی که تقویت نشده است، افزایش می یابد. الیاف شیشه ، استحکام پایین تری نسبت به الیاف کربن از خود نشان می دهند . الیاف آرامیدیک ، پایین ترین استحکام را دارند . اگر قیمت خیلی مهم باشد ،الیاف شیشه بهترین گزینه می باشد . از طرف دیگر ، مدول یانگ افزایش قابل ملاحظه ای از خود نشان می دهد. همچنین مشاهده شده است که باروش بسیار ساده و با اعمال نیروهای اولیه ، سفتی نمونه ها به طو رقابل ملاحظه ای افزایش می یابد به این صورت که لایه های کامپوزیتی را به نمونه ها می چسبانیم . سپس به این نمونه ها در خلاف جهتی که قرار است تحت خمش قرار گیرند ، نیرو وارد می کنیم . مشاهده می شود که در این حالت، سفتی قطعه ۸۰٪ نسبت به حالتی که استحکام بخشی نشده است، افزایش پیدا می کند. اما باید در نظر داشت که آزمایشهای بیشتری برای مشخص کردن این خصوصیت احتیاج می باشد ، با تمام این اوصاف این روش استحکام بخشی برای سازه های چوبی قدیمی و تاریخی ، بسیار امیدوار کننده می باشد.

**کلید واژه ها:** استحکام بخشی. سازه های چوبی غیر مسلح ، کامپوزیتهای پایه پلیمری.

### ۱- مقدمه:

استفاده از مواد کامپوزیتی برای استحکام بخشی سازه ها و بخصوص سازه های چوبی موضوع جدیدی نیست . استفاده از تاندونهای کامپوزیتی (Tendons) برای المانهای تحت تنش بوسیله ی Rubinsky (1954) و

بوسیله Kaifasz (1960) [۲] مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است. امکان استفاده از کابل‌های سبک و با استحکام بالا، در مورد سازه‌هایی که بوسیله کابل نگه داشته می‌شوند، مانند پلها، توسط (MEIER 1987) مورد مطالعه قرار گرفته است. [۳] در سال ۱۹۸۷، Fujisaki و همکارانش و در سال ۱۹۸۹ Ehsani و Audatmanesh، امکان جایگزینی فولادها، که بطور سنتی در داخل بتن‌ها به عنوان تقویت کننده استفاده می‌شوند، توسط میله‌های کامپوزیتی را مورد مطالعه قرار دادند و همچنین اثبات کردند که واکنش این مواد تحت بار می‌تواند بوسیله روش‌های عددی پیش‌بینی شود و از این پیش‌بینی‌ها در کارهای عملی استفاده شود [۴] [۵]. مهم‌ترین مزیت این مواد برای استفاده در داخل بتن، مقاومت آنها در مقابل خوردگی می‌باشد. در سال ۱۹۸۶، Ranisch و Rostasy و در سال ۱۹۸۹، Saadatmanesh و Ehsani امکان افزایش استحکام بخشی سازه‌های موجود با استفاده از ورقه‌های کامپوزیتی را مورد مطالعه قرار دادند. [۵] [۶]. در این تحقیقات از رزین اپوکسی برای چسباندن ورقه‌های کامپوزیتی به سازه استفاده شده است. برای اینکار ورقه‌های نازک کامپوزیت را بوسیله رزین اپوکسی به سطح خارجی ستون‌های تحت تنش‌های کششی متصل کردند. این مطالعات اثبات کرد که ورقه‌های کامپوزیتی تک‌جهته برای تقویت المان‌های تحت تنش کششی بسیار مناسب هستند. همچنین سفتی (Stiffness) سازه را به مقدار قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌دهد. سفتی عبارت است از مقدار مقاومت قطعه در مقابل تغییر شکل که متناسب با مدول یانگ می‌باشد.

#### جدول ۱. موارد استفاده از کامپوزیتهای پایه پلیمری (FRP) به منظور استحکام بخشی در برابر زلزله

	Type of intervention using FRP materials	Related problems
Wood structures	Flexural reinforcement of wood beams using FRP sheets and re-bars epoxy-bonded or inserted in wood-beams in tension zone;	Adhesion between FRP materials and wood/masonry surface;
	Shear reinforcement of wood beams	Aging behavior of reinforcement and adhesion;
Masonry structures	Shear reinforcement of masonry walls using FRP sheets epoxy-bonded to masonry walls or embedding FRP re-bars mounted near the surface of masonry walls;	High and low temperatures behavior;
	Flexural reinforcement of masonry walls	Connections of different shapes of FRP materials;
	Seismic upgrading intervention on masonry vaults using FRP sheets;	Dynamic behavior of the reinforced structures;
	Confinement of masonry columns with FRP sheets;	Types of mortars used in order to leveling masonry surfaces to which the FRP sheets are bonded;
	Provisional intervention in order to put in security damaged masonry buildings;	Creep behavior;
	Connection of multiple leaf masonry walls (re-bars).	Monitoring methods of reinforced structures (adhesion faults, decreases in mechanical properties of new material, etc)

در سال ۱۹۹۱ Deskovic و Triantafillou روش مذکور را توسعه دادند [۷]. آنها اثر اعمال تنش اولیه بر روی کامپوزیتها و قبل از چسباندن آن به سطح قطعه مورد نظر را مورد بررسی قرار دادند. همچنین آنها برای اولین بار پیشنهاد دادند که از کامپوزیت‌های پایه پلیمری برای استحکام بخشی سازه های چوبی استفاده شود. تا قبل از تحقیق آنها، مطالعات فقط بر روی سازه های بتنی و سازه های بتنی تقویت شده، متمرکز بود. در سال ۱۹۹۲، Plevris و Triantafillou، مطالعات بنیادی و اساسی تری بر روی رفتار سازه های چوبی تقویت شده با FRP انجام دادند [۸]. آنها اثر تقویت سطح خارجی این سازه ها را بر روی مکانیزهای شکست، خواص سفتی و داکتیلیتی مورد بررسی قرار دادند. این سازه ها تحت ترکیبی از نیروهای خمشی و نیروهای محوری قرار گرفته بودند.

با توجه به افزایش روشهای عددی حل مسائل، آنها توانستند نتیجه بگیرند که حتی نسبت سطوح تقویت شده بسیار کمی می تواند افزایش قابل توجهی در رفتار مکانیکی المانها ایجاد کند. با توجه به اینکه این تکنیک، سازه های چوبی بسیار خراب را نیز می تواند تحت مرمت و بازسازی قرار دهد. در مورد سازه های چوبی قدیمی و تاریخی بسیار معمول خواهند بود.

در این بخش قصد بر این است که روش و آزمایشاتی که Antonio Borri و همکاران بر روی المانهای چوبی تقویت شده و تقویت نشده انجام داده اند. با جزئیات بیشتری مورد بررسی قرار گیرند. [۹]

## ۲- مواد و روش استفاده شده:

### - مواد استفاده شده

Antonio Borri و همکارانش سه نوع چوب را برای آزمایش مورد استفاده قرار دادند. چوب شاه بلوط، چوب بلوط و چوب صنوبر. چوب شاه بلوط و بلوط به عنوان چوبهای درجه یک با عیوب بسیار کم مطرح هستند ولی چوب صنوبر جزو چوبهای درجه سه و با عیوب عمیق می باشند. میزان رطوبت چوبهای شاه بلوط، بلوط و صنوبر به ترتیب ۹٪، ۱۱٪، ۱۵٪ گزارش شده است. همچنین دانسیته این چوبها به ترتیب ۵/۴، ۸/۹۸ و ۴/۲۴ K N/m<sup>3</sup> می باشد. برای تقویت این المانها سه نوع الیاف مختلف مورد استفاده قرار گرفتند که عبارتند از: الیاف کربن (CFRP)، الیاف شیشه (GFRP) و الیاف آرامید (KFRP).

خواص فیزیکی و مکانیکی این الیاف ها در جدول شماره ۲ آمده است. برای درک بهتر مقادیر جدول می توان استحکام کششی این مواد را با فولادهای ساختمانی مقایسه کرد. استحکام کششی فولادهای ساختمانی در محدوده ۲۹۰ تا ۸۶۰ (MPa) می باشد.

## جدول ۲: خواص فیزیکی و مکانیکی الیاف

	Carbon Fibres	Aramidic Fibres	E Glass Fibres
Aerial density $D_s$ , [Kg m <sup>-2</sup> ]	0.300	1440	0.300
Ply equivalent thickness, [mm]	0.165	0.070	0.118
Tensile Strength, [MPa]	3430	3150	1550
Tensile Young's modulus, [MPa]	230000	105000	75000
Strain at failure, %	1.5	3.0	2.1

ضخامت ورقه های الیاف به صورت خشک برای الیافهای کربنی، شیشه و آرامید به ترتیب ۱۶۵/، ۱۱۸/، ۰/۰۷۰ می باشد. برای چسباندن این کامپوزیتها به چوب، از ترکیب دو نوع رزین اپوکسی که دردمای اتاق پخت می شوند، استفاده شده است. که یکی به عنوان رزین اولیه (prime) و دیگری به عنوان رزین اشباع (Saturant) می باشد. خواص فیزیکی و مکانیکی این رزینها در جدول شماره ۳ آمده است. روش چسباندن کامپوزیتها به چوب به این صورت است که ابتدا رزین اولیه را به سطح چوب و درجایی که قرار است تقویت شود، می کشیم. بعد از پلیمریزاسیون جزئی این لایه رزین اشباع به عنوان لایه دوم کشیده می شود. سپس الیاف به عنوان لایه سوم بر روی رزین اشباع قرار داده شده و بالای دیگر از رزین اشباع پوشانده می شود. سپس اجازه داده می شود که عمل پلیمریزاسیون کامل رزین اشباع انجام شود. بعد از چند ساعت کامپوزیت مورد نظر سفت و محکم می شود. ولی کامل شدن این فرایند دردمای ۲۰ درجه در حدود ۷ روز طول می کشد.

## جدول ۳: خواص فیزیکی و مکانیکی رزین ها

	Primer	Saturant
Tensile Strength (ASTM D638)	>12 MPa	>50 MPa
Tensile Strength from bending test (ASTM D790)	>24 MPa	>120 MPa
Compression Strength (ASTM D695)	-	>80 MPa
Elongation at break, % (ASTM D638)	3.0	2.5
Flexural Young's modulus (ASTM D790)	>580 MPa	>3500 MPa
Tensile Young's modulus (ASTM D638)	>700 MPa	>3000 MPa

## روش آزمایش:

آزمایشات مکانیکی بر روی نمونه های تقویت نشده، آزمایشات استحکام چسبندگی کامپوزیتها به المانهای چوبی و آزمایشات مکانیکی بر روی المانهای تقویت شده انجام شده است. خواص مکانیکی چوبهای شاه بلوط و بلوط بوسیله تست فشار و تست خمش تعیین شده است. این آزمایشات بر طبق استانداردهای UnI ISO3132 و UnI ISO3349 انجام شده است. اما در مورد چوب صنوبر فقط تست خمش انجام شده است. استحکام چسبندگی المانهای چوبی با تقویت کننده های CFRP و GFRP مورد مطالعه قرار گرفته است. این آزمایشات بر روی چوبهای درجه یک انجام شده است. مدول یانگ و استحکام المانهای تقویت

شده اندازه گیری شده است. برای اطلاعات بیشتر در مورد جزئیات آزمایش می توان به مرجع [۹] مراجعه کرد.

#### نتایج و بحث :

خواص مکانیکی المانهای چوبی تقویت نشده در جدول شماره ۴ آمده است. این جدول نشان می دهد که چوب شاه بلوط و بلوط از نظر خواص مکانیکی بسیار شبیه هم هستند. اما چوب صنوبر از نظر مدول یانگ و استحکام ضعیف تر است.

جدول ۴. خواص مکانیکی المانهای چوبی تقویت نشده

	Chestnut wood	Oak wood	Fir wood
<b>COMPRESSION TESTS</b>			
Number of tested samples	10	10	10
Load velocity [mm/min]	2	2	2
Young's modulus [MPa]	11900	12650	4538
Failure stress [MPa]	50.10	55.40	32.70
Sample dimensions [mm]	60x20x20	60x20x20	60x20x20
<b>BENDING TESTS</b>			
Number of tested samples	30	30	4
Young's modulus [MPa]	5992	6760	6639
Failure load [N]	1844	2164	14528
Sample dimensions [mm]	20x20x350	20x20x350	100x100x2000

نتایج مربوط به استحکام چسبندگی در جدول ۵ آمده است. نتایج آزمایش نشان می دهد که جهت قرار گیری الیاف چوب و الیاف های تقویتی نسبت به یکدیگر بسیار مهم است. اگر الیاف های کامپوزیت مماس و موازی بر الیاف چوب باشند، در این صورت، حالت بحرانی در چوب اتفاق می افتد. الیاف کامپوزیت به چوب متصل می مانند ولی خود الیاف چوب از همدیگر جدا شده و باعث تخریب المان می شود. در این حالت استحکام کششی اندازه گیری شده تقریباً  $7 \text{ (MPa)}$  می شود و نوع الیاف کامپوزیت تاثیر قابل ملاحظه ای در مورد این استحکام ندارد. اما وقتی که جهت الیاف کامپوزیت عمود بر الیاف چوب باشد. حالت بحرانی و تخریب در تنشهای بالاتر حدود  $10 \text{ (MPa)}$  اتفاق می افتد. در این صورت تخریب به صورت جدا شدن الیاف کامپوزیت از چوب می باشد. در این حالت نیز استحکام چسبندگی با تغییر نوع الیاف کامپوزیت تغییر محسوسی نمی کند.

### جدول ۵. نتایج مربوط به استحکام چسبندگی

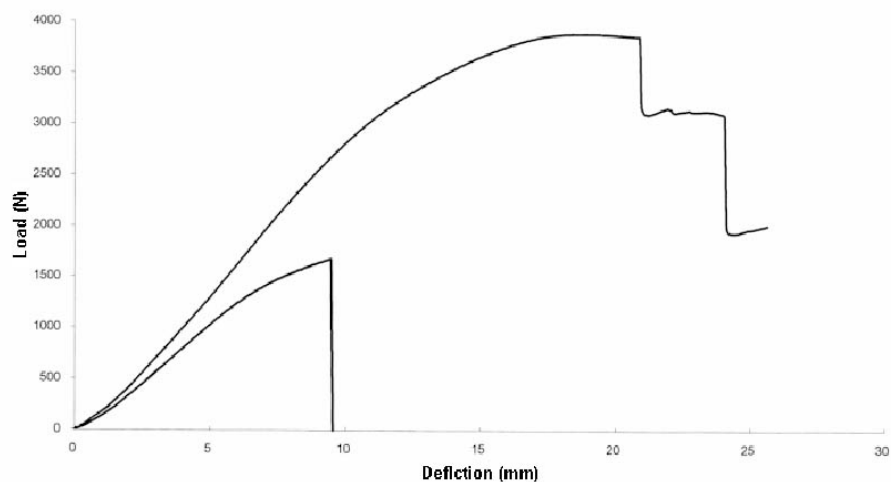
	Chestnut wood	Oak wood
Type of reinforcement	CFRP	CFRP
Number of tested samples	5	5
Load speed [mm/min]	0.2	0.2
Adhesion surface [mm]	20x10	20x10
Failure stress [MPa]	9.76	10.20
Wood sample dimensions [mm]	60x20x10	60x20x10
Type of reinforcement	GFRP	GFRP
Number of tested samples	5	5
Load speed [mm/min]	0.2	0.2
Adhesion surface [mm]	10x10	10x10
Failure stress [MPa]	8.32	9.13
Wood sample dimensions [mm]	60x20x10	60x20x10

نتایج تست خمش در جدول ۶ آمده است. می توان نتیجه گرفت که الیاف کربن بیشترین افزایش استحکام خمشی را از خود نشان می دهد. این افزایش استحکام به مقدار ۸۸٪ و ۸۳٪ به ترتیب برای چوب شاه بلوط و بلوط گزارش شده است.

### جدول ۶. نتایج تست خمش

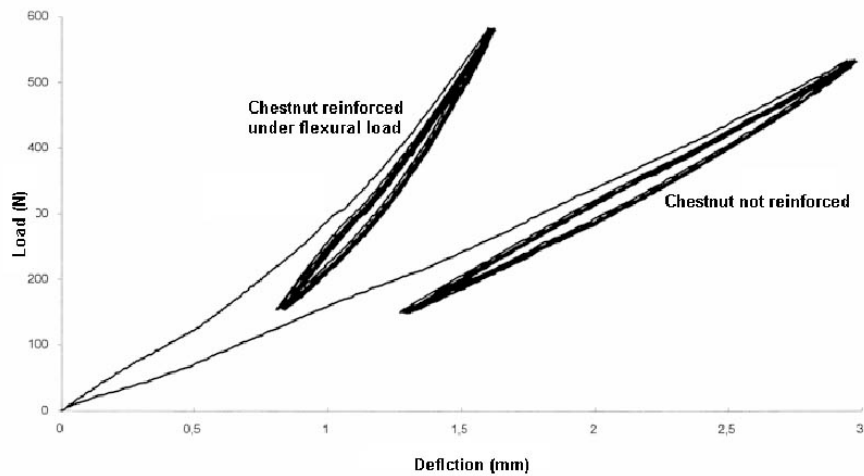
Wood type	Chestnut wood	Oak wood
Sample dimensions [mm]	350x20x20	350x20x20
Reinforcement	CFRP	CFRP
Number of tested samples	10	10
Area fraction of fiber composite $\rho$	0.00825	0.00825
Stiffness increment (%)	+28.9 %	+22.8 %
Failure load [N]	3474	3964
Failure load increment (%)	+88.4 %	+83.2 %
Reinforcement	GFRP	GFRP
Number of tested samples	10	10
Area fraction of fiber composite $\rho$	0.00590	0.00590
Stiffness increment (%)	+27.9 %	+16.5 %
Failure load [N]	3054	3405
Failure load increment (%)	+65.6 %	+57.3 %
Reinforcement	KFRP	KFRP
Number of tested samples	10	10
Area fraction of fiber composite $\rho$	0.00350	0.00350
Stiffness increment (%)	+14.9 %	+13.9 %
Failure load [N]	2822	3133
Failure load increment (%)	+53.0 %	+44.8 %

این نتایج دور از انتظار نبودند. چون هم ضخامت الیاف کربن نسبت به الیاف شیشه و آرامید بیشتر و هم استحکام و مدول یانگ آن بیشتر بود. در شکل ۱ منحنی جابه جایی - نیرو برای دو نمونه مختلف گزارش شده است. یک نمونه المانهای تقویت نشده و دیگری المانهای تقویت شده می باشد. همچنان که مشاهده می شود هر دو نمونه در شروع رفتار الاستیک از خود نشان می دهند. در مورد المانهای تقویت نشده هیچگونه رفتار پلاستیکی مشاهده نمی شود و قطعه بصورت تردمی شکند. اما در مورد المانهای تقویت شده شاهد نقطه تسلیم هستیم. و قطعه رفتار پلاستیکی از خود نشان می دهد.



شکل ۱. منحنی جابه جایی - نیرو برای دو نمونه مختلف تقویت شده و تقویت نشده

یکی از موارد جالبی که توسط Antonio Borri مورد مطالعه قرار گرفته است، اثر اعمال نیروهای خمشی اولیه بر روی نمونه ها، برای افزایش سفتی نمونه ها می باشد. این اثر در شکل ۲ آمده است. نیروی خمشی اولیه در خلاف جهت نیرویی است که در مرحله تست خمش به قطعه وارد می شود. این نیروی اولیه ۲۵٪ برابر نیروی نهایی اعمال شده به چوب تقویت نشده است. مشاهده شده است که با اعمال این نیروی اولیه افزایش سفتی نمونه تقویت شده نسبت به نمونه تقویت نشده تقریباً برابر ۸۰٪ می باشد. در صورتی که اگر این نیروی اولیه به نمونه تقویت شده اعمال شود افزایش سفتی تقریباً برابر ۲۸٪ را مشاهده خواهیم کرد. البته پیشنهاد شده است که مطالعات بیشتری برای به دست آوردن نتایج دقیقتر در مورد این اثر انجام شود.



شکل ۲. اثر اعمال نیروهای خمشی اولیه بر روی افزایش سفتی نمونه های تقویت شده و تقویت نشده

### ۳- نتیجه گیری:

در این مقاله سعی شده است ، امکان استفاده از کامپوزیتهای پایه پلیمری (FRP) برای استحکام بخشی و بهبود مقاومت درمقابل زلزله بر روی سازه های چوبی مورد بررسی قرار گیرد. برای اینکار خلاصه ای از کارهایی که محققان دیگر انجام داده اند گرد آوری شده است . برای بررسی تاثیر کامپوزیتهای پایه پلیمری (FRP) بر روی استحکام بخشی سازه های چوبی ، نتایج تست خمش که بر روی نمونه های تقویت شده و تقویت نشده انجام شده ، مورد مطالعه قرار گرفت .سازه های چوبی بسیاری در داخل ایران وجود دارند که بصورت تقویت نشده می باشند. بسیاری از این سازه ها جزوی از میراث ملی کشور محسوب می شوند. این سازه ها درمقابل زلزله بیشترین آسیب را می بینند. جایگزین کردن تمامی قطعات زیر استاندارد این سازه ها گران تمام می شود. علاوه بر این برای مرمت و نگهداری بناهای تاریخی کشور به یک روش مبتکرانه نیازمند است. به عنوان یک نتیجه گیری می توان گفت که اکثر این سازه ها نیازمند تقویت درمقابل زلزله می باشد. جدول شماره (۱) مواردی را که می توان از FRP برای استحکام بخشی و بهبود مقاومت در مقابل زلزله استفاده کرد را نشان می دهد. در این نوشتار موادی که بصورت مبتکرانه برای استحکام بخشی سازه های چوبی مورد استفاده قرار گرفته است، بررسی می شود.

### منابع:

[1] Rubinsky, I. A. and Rubinsky, A. (1954). A preliminary investigation of the use of



- fibre-glass prestressed concrete, *Mag. Concr. Res.*, 6(17), 71-78.
- [2] Kaifasz, S. (1960). Some tests on beams prestressed by fibre-glass cords, *Mag. Concr. Res.*, 12(35), 91-98.
- [3] Meier, U. (1987). Proposal for a carbon fibre reinforced composite bridge across the Strait of Gibraltar at its narrowest site, *Inst. Mech. Engrs.*, 201(B2), 73-78.
- [4] Fujisaki, T., Matsuzaki, Y., Seijima, K. and Okamura, H. (1987). New material for reinforced concrete in place of reinforcing steel bars, *IABSE Symp., Concrete Structures of the Future, Paris, France*, 425-432.
- [5] Saadatmanesh, H. and Ehsani, M. (1989). Application of fiber-composites in civil engineering, *Structures Congress '89, ASCE*, 526-535.
- [6] Ranisch, E. H. and Rostasy, F. S. (1986). Bonded steel plates for the reduction of fatigue stresses of coupled tendons in multispan bridges, *Adhesion between polymers and concrete, RILEM, Chapman and Hall, London, England*, 561-570.
- [7] Triantafillou, C. T. and Deskovic, N. (1991). Innovative Prestressing with FRP sheets: mechanics of short-term behavior, *Jour. of Eng. Mech.*, 117(7), 1652-1673.
- [8] Plevris, N. and Triantafillou, T. C. (1992). FRP-Reinforced wood as structural material, *Jour. of Mat. in Civil Eng.*, 4(3), 300-317.
- [9] Giordano, G. (1964). *La moderna tecnica delle costruzioni in legno*, Hoepli, Milano.