

Effet de l'orientation des fibres et leur type (CFRP/GFRP) sur le comportement des colonnes en béton

H. BOUCHELAGHEM^{a,b}, A. BEZAZI^b, M. BOUMAAZA^c, N. ZANACHE^c, F. SCARPA^d.

a. Département de Génie Mécanique, Faculté des Sciences de la Technologie, Université des frères Mentouri, Constantine 25000, Algérie.

b. Laboratoire de Mécanique Appliquée des Nouveaux Matériaux (LMANM), Université 8 Mai 1945, Guelma 24000, Algérie.

E-mail: bouchelaghem_h@yahoo.fr

E-mail: ar_bezazi@yahoo.com

Tel: 037 21 58 49

Fax: 037 20 72 68

c. Laboratoire de Génie Civil et Hydraulique (LGCH), Université 8 Mai 1945, BP 401, Guelma 24000, Algérie.

messoudabeb@yahoo.fr

zanachenaziha@yahoo.fr

d. Department of Aerospace Engineering, University of Bristol, BS8 1TR Bristol, UK.

f.scarpa@bristol.ac.uk

Résumé :

L'actuel travail est une étude expérimentale menée sur le comportement des colonnes courtes en béton renforcées (confinées) par collage extérieur des plis unidirectionnels et bidirectionnels de fibres de carbone (CFRP) et de verre_E (GFRP) respectivement sollicitées en compression uniaxiale. Plusieurs orientations sont effectuées pour mieux cerner l'effet de l'orientation des fibres sur le comportement de ces colonnes, l'étude prouve que l'empilement (0/90)₂ est celui qui donne le bon comportement. A cet effet, un confinement par cette orientation à été réalisé mais cette fois en utilisant les fibres de carbone (CFRP). Des jauges d'extensométrie sont collées sur les surfaces externes de l'enveloppe composite dans le but de mesurer le raccourcissement axial et l'expansion radiale par l'intermédiaire d'un pont de Wheatstone. Les résultats obtenus montrent bien que les colonnes renforcées par les plis de fibres de carbone permettent une augmentation appréciable de la contrainte à la rupture en compression comparativement avec celles confinées par les fibres de verre_E. Le type de rupture des colonnes confinées dépend fortement de l'orientation des fibres et du type de renfort.

Abstract :

The present work is an experimental investigation, under compression tests, of the behavior of short concrete columns reinforced (confined) by an external coating of unidirectional and woven of carbon fibers (CFRP) and glass_E (GFRP) respectively. Several of composite lay ups are conducted in order to identify the effect of fiber orientation on the behavior of these columns, it has been found that the

lay-up (0/90)₂ is the one that gives good behavior. To this end, a confinement of this lay-up was realized but this time using the carbon fiber (CFRP). The strain gauges are glued on the external surfaces of the composite jacket in order to measure the axial shortening and radial expansion using a Wheatstone bridge. The results obtained show that the columns reinforced by the carbon fibers allow a significant increase in compressive stress compared to those confined by the glass ones (GFRP). The confined columns failure type strongly depends on the fiber orientations and reinforcement type.

Mots clefs : Cylindre en béton, GFRP, CFRP, Essai de compression, Matériaux composites, Orientation des fibres.

1 Introduction

Le problème de la durabilité des bétons se situe à la frontière de la technologie actuelle des matériaux. Pour éviter des travaux d'entretien onéreux ou des dégâts provoqués par des événements exceptionnels (séismes, accident de véhicule roulant dans les ponts routier, etc.), un haut niveau de fiabilité est essentiel [1]. Les colonnes en béton sont les composants structuraux fondamentaux en structures civiles. Ces dernières années, la réparation, l'adaptation ultérieure, et le renforcement des colonnes en béton endommagées à l'aide des matériaux composites FRP (Fiber Reinforced Polymer) s'enveloppant ou par chemisage deviennent de plus en plus importants dans les infrastructures civiles dues au haut rapport résistance/rigidité par rapport au poids, de la résistance à la corrosion, et de la facilité de l'installation des FRP. En plus, la capacité structurale de l'FRP peut être travaillée et maximisée en alignant les fibres le long de l'orientation optimale [2].

Il existe à présent de nombreuses possibilités d'application de cette technique de renforcement. Dans une structure courante en béton armé il est possible de renforcer presque tous les éléments de construction: colonnes, poutres, dalles, murs. Cette technique permet d'améliorer: la capacité portante, la rigidité, la durée de vie de la structure, la durabilité de la structure, exposée aux attaques environnementales [3]. De nombreux travaux de recherches et de réalisations pratiques ont démontré l'efficacité de la technique de réhabilitation des bâtiments et des ouvrages d'art par le collage d'éléments composites utilisés comme renforcement externe [4-7].

Un programme expérimental réalisé par Shehata et al [8] comprenant des essais sur 54 colonnes courtes fut entrepris en vue de déterminer le gain de résistance et de ductilité des colonnes en béton sur le plan externe en les recouvrant par des feuilles de PRFC. Les variables étudiées étaient la forme de la section transversale (circulaire, carrée et rectangulaire), et la quantité de renforcement, mesurée par le nombre de plis de PRFC appliquée aux modèles (une ou deux couches). En prenant comme base les résultats obtenus, des équations ont été proposées pour calculer la résistance du béton confiné et sa déformation spécifique ultime en fonction de la contrainte latérale de confinement, pour chaque forme de section transversale utilisée : circulaire, carrée et rectangulaire. Les estimations données par ces équations et celles données par des formules trouvées dans la littérature ont été comparées avec les résultats expérimentaux et des conclusions générales ont finalement été établies.

Zhang et al [9] ont étudié expérimentalement les effets de différentes architectures de confinement en matériaux composites sur l'efficacité du renforcement des colonnes en béton enveloppées puis chargées en compression. De plus ces auteurs ont proposé d'évaluer l'efficacité de chaque système individuel par un index de coût. Ils ont examinés cinq différents types d'architectures composites constitués de fibres (verre_E et carbone), et de résines (Vinyle-ester et époxyde).

Hadi [10] a étudié le comportement des colonnes enveloppées extérieurement par deux types de matériaux composite et chargées excentriquement. Six colonnes cylindriques (205 × 925 mm) ont été moulées et examinés. La moitié des colonnes ont été confinées par des plis en PRFV et les autres avec

des plis en PRFC. Toutes les colonnes ont été horizontalement enveloppées avec trois couches de matériau composite (PRFV ou PRFC). Une colonne en béton armé a été également coulée et testée pour servir d'une colonne de référence. L'auteur a conclu que le gain considérable en résistance et en ductilité sont obtenus dans le cas d'un renforcement par des couches en PRFC (renforcées verticalement et horizontalement). Le béton utilisé dans son étude est un béton de haute résistance (résistance à la compression = 65 MPa).

Une étude expérimentale et analytique a été réalisée par Tamuzs et *al* [11] sur la déformabilité et le renforcement du béton par des bars d'acier, comparé avec les propriétés des éprouvettes en béton confiné extérieurement par matériaux composites. Ils ont réalisé des expériences afin d'estimer la participation entre le renforcement par des barres d'acier et le confinement par un composite carbone/époxy des cylindres en béton, pour cela deux mélanges de béton sont utilisés (béton de 25 MPa et 50 MPa).

Le travail actuel est une étude expérimentale menée sur le comportement des éprouvettes en béton (160 x 320 mm) renforcées par collage extérieur des plis unidirectionnels et bidirectionnels en fibres de carbone (CFRP)/époxyde et de verre_E (GFRP)/polyester respectivement. Huit orientations sont effectuées pour mieux cerner l'effet de l'orientation des fibres sur le comportement des colonnes confinées sollicitées en compression uni-axiale. De plus, un confinement par 4 plis d'une nappe unidirectionnelle en fibres de carbone (CFRP) a été réalisé dans le but de mettre en évidence l'influence de type (nature) du renfort. Les résultats obtenus montrent bien que les colonnes renforcées par les CFRP permettent une augmentation appréciable de la contrainte à la rupture en compression (153%) comparativement aux celles confinées par GFRP. Les faciès de rupture des colonnes confinées dépendent fortement de l'orientation des fibres et du type (nature) de renfort.

2 Protocole expérimental

2.1 Fabrication et préparation des éprouvettes

L'étude est menée sur des éprouvettes en béton ayant une forme cylindrique de dimension standard (160 × 320 mm). Elles sont préparées par série de 50 échantillons par une société ayant une centrale à béton (GESI-BAT, Algérie) permettant ainsi l'obtention des éprouvettes ayant des caractéristiques plus ou moins uniformes. La cure du béton a été faite à température ambiante pour une durée de 28 jours. Les surfaces des éprouvettes sont nettoyées afin d'avoir une surface propre permettant de recevoir la résine et même pour assurer la bonne cohésion entre le béton et l'enveloppe composite. Une pierre (meule) a été utilisée pour rectifier les extrémités des surfaces cylindriques des éprouvettes afin d'assurer leur planéité.

2.2 Renforcement par FRP

Les colonnes sont confinées par deux types de renforts GFRP (**Glass Fiber Reinforced Polymer**) et CFRP (**Carbon Fiber Reinforced Polymer**). Le GFRP est un tissu bidirectionnel en fibre de verre_E d'une densité surfacique de 500 g/m² appliqué avec une résine polyester, alors que le CFRP est une nappe unidirectionnelle en fibre de carbone **SIKA WRAP HEX 230 C** avec une résine époxyde **SIKADUR 330**. La longueur d'un pli de confinement correspond au périmètre (pour une couche) ou à n fois le périmètre de l'éprouvette considérée (pour n couches). De plus, la couche extérieure est prolongée de 1/4 du périmètre (recouvrement dans la direction longitudinale des fibres) afin d'assurer un chevauchement, ce qui permet de développer une pleine résistance des fibres, sans glissement ni décollement de la couche composite [12-13].

2.3 Machine d'essai

Les colonnes renforcées sont testées en compression uni-axiale à l'aide d'une presse hydraulique de type "CONTROLS_ Model 50-C55G2/L" à affichage **DIGIMAX plus** d'une capacité de 3000 kN. Les colonnes sont disposées entre les deux plateaux de la presse ; le plateau supérieur est mobile en rotation de telle sorte à épouser la forme de la surface de l'éprouvette. L'effort vertical est appliqué, par l'intermédiaire du plateau inférieur, progressivement avec une vitesse de chargement constante jusqu'à la rupture. Les données sont transmises au système d'acquisition automatique par l'intermédiaire d'une interface. Des jauges d'extensométries sont collées au milieu des colonnes verticalement et horizontalement pour mesurer respectivement les déformations axiales et radiales.

3 Résultats et discussions

3.1 Effet de l'orientation des fibres

Le comportement des colonnes renforcées sont représentées dans figure 1 sous forme de courbes charge/temps, huit empilements ont été utilisés pour mieux cerner l'effet de l'orientation des fibres sur le comportement des colonnes confinées ; les empilements employés sont : $(+20/-70)_2$, $(+25/-65)_2$, $(+30/-60)_2$, $(+35/-55)_2$, $(+40/-50)_2$, $(\pm 45)_2$, $(+50/-40)_2$, et $(0/90)_2$, ont été comparés avec le comportement du béton de contrôle. D'après les résultats obtenus toutes les courbes s'effectuent en trois phases:

- la première phase, non linéaire très courte qui peut être due au mauvais contact entre l'éprouvette et l'appui supérieur de la machine.

- une seconde phase quasi linéaire, correspondant au comportement du béton et c'est dans cette phase qu'a lieu la formation des microfissures. Le renforcement des colonnes par GFRP utilisant les empilements $(0/90)_2$ et $(+30/-60)_2$ améliore leur comportement en termes de rigidité et de résistance, les éprouvettes confinées par les autres empilements sont caractérisées par un comportement légèrement moins rigide mais avec une charge ultime assez importante.

- la troisième phase où l'éprouvette en béton de contrôle ne résiste plus (non existence de la troisième phase). Cette phase caractérise le confinement $(0/90)_2$, alors qu'elle est très courte dans les autres empilements. Le chargement augmente jusqu'à la rupture par déchirement de l'enveloppe composite à ses extrémités.

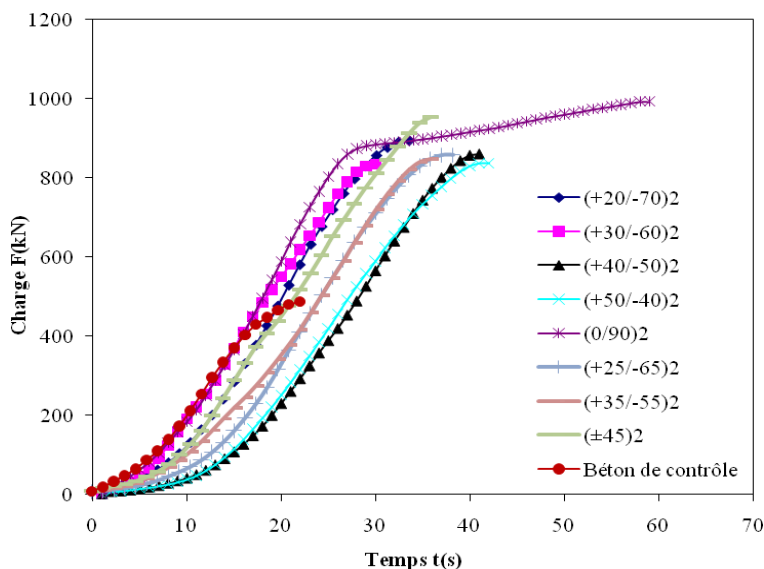


Figure 1. Courbes charge-temps des éprouvettes en béton renforcées par différentes orientations.

L'Analyse des résultats obtenus montre que le taux d'amélioration de la résistance ultime des éprouvettes confinées est nettement plus élevé comparativement à celui du béton de contrôle (voir tableau 1). La figure 1 montre bien que l'orientation des fibres joue un rôle très important dans le renforcement et la réparation des éprouvettes.

Tableau 1. Efficacité de renforcement des colonnes en béton par 2 plis en GFRP.

Différentes orientations utilisées	Charge maximale F_{max} (kN)	Efficacité de renforcement [%]
Béton de contrôle	537,8	—
$G_{-(0/90)_2}$	992,67	84,57
$G_{-(+20/-70)_2}$	864,1	60,11
$G_{-(+25/-65)_2}$	858,7	59,66
$G_{-(+30/-60)_2}$	834,38	55,14
$G_{-(+35/-55)_2}$	847,48	57,58
$G_{-(+40/-50)_2}$	843,5	56,84
$G_{-(\pm 45)_2}$	953,84	77,35
$G_{-(+50/-40)_2}$	814,3	51,41
$C_{-(0/90)_s}$	1315,51	144,60

3. 2 Comparaison entre les GFRP et CFRP

La figure 2 présente une comparaison entre les empilements qui donnent un meilleur comportement charge/temps à savoir : $(+30/-60)_2$, $(0/90)_2$ en GFRP et $(0/90)_s$ en CFRP par rapport à celui du béton de contrôle. Le comportement est similaire à celui des éprouvettes confinées par les autres empilements mais avec des charges ultimes plus importantes et une rigidité notable avec des gains en résistance soit : plus de 144% pour l'empilement $(0/90)_s$ en CFRP ; 84,5% pour l'empilement $(0/90)_2$ et 55% pour $(+30/-60)_2$ en GFRP. Dans la première et la deuxième phase toutes les courbes sont presque identiques, mais la troisième phase est formée seulement pour les empilements $(0/90)_2$ et $(0/90)_s$ en GFRP et CFRP respectivement.

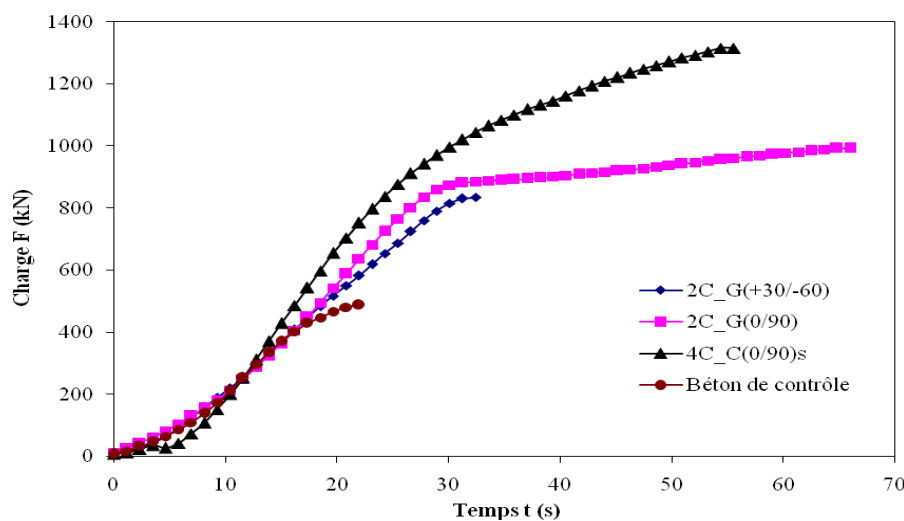


Figure 2. Comparaison du comportement des colonnes renforcées par les meilleurs empilements : $(0/90)_2$, $(+30/-60)_2$ en GFRP et $(0/90)_s$ en CFRP avec celui du béton de contrôle.

3.3 Comportement contrainte/déformation

Les résultats des essais sont présentés graphiquement sous forme de courbes contrainte/déformations dans la figure 3. Les courbes des contraintes sont tracées en fonction des déformations axiales et radiales dans le même repère. Typiquement, ces courbes présentent une pente initiale qui suit celle du béton de contrôle jusqu'à un point d'inflexion, suivie d'une zone de grande déformation plastique. Tandis que, la deuxième pente dans la zone plastique, beaucoup plus faible que la première, dépend de l'orientation et la nature des fibres de l'enveloppe composite.

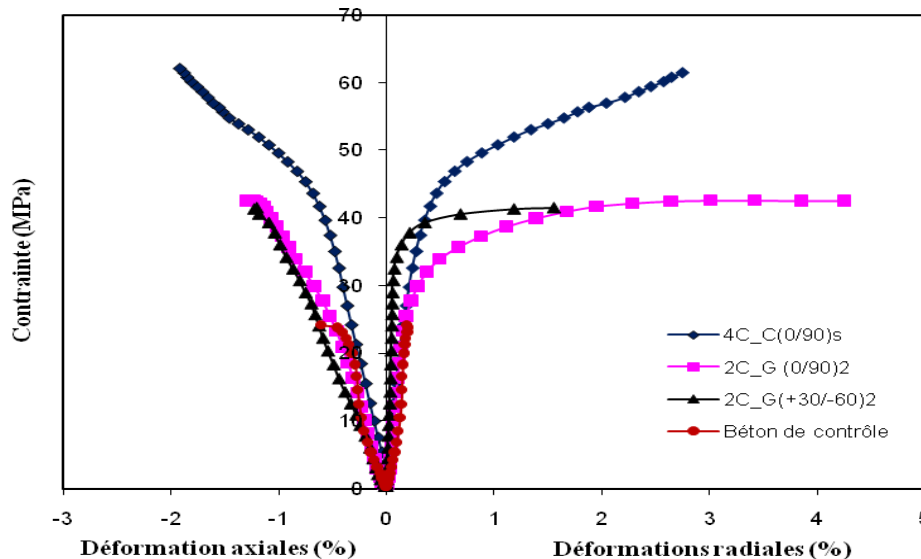


Figure 3. Comportement contrainte/déformation des éprouvettes renforcées par GFRP $(+30/-60)_2$, et $(0/90)_2$ comparées avec le béton de contrôle.

Le comportement contraintes/déformations des éprouvettes en béton renforcé par GFRP et CFRP montre bien l'efficacité de cette technique de renforcement et/ou de réparation du béton. Les FRP et les orientations utilisées dans cette étude représentent des gains élevés en résistance et en déformations (voir tableau 2).

Tableau 2. Résultats des cylindres en béton confinés par CFRP et GFRP.

Désignations	F_{max} (kN)	f'_c (MPa)	f'_{cc} (MPa)	f'_{cc}/f'_{co}	ϵ_{cc} %	$\epsilon_{cc}/\epsilon_{co}$	$\epsilon_{r,rup}$ %	$\epsilon_{r,rup}/\epsilon_{ro}$
Béton de contrôle	487,14	24,24	24,24	1	0,61	1	0,195	1
2C-G(+30/-60) ₂	834,40		41,52	1,71	0,37	0,62	0,975	5,00
2C-G(0/90) ₂	992,67		47,14	1,95	4,49	7,40	12,36	63,63
4C_C(0/90) _s	1315,51		61,45	2,53	1,87	3,06	2,74	14,05

f'_{cc} : résistance en compression axiale du béton confiné ; ϵ_{cc} , $\epsilon_{r,rup}$: déformations axiale et radiale respectivement.

D'après les résultats obtenus les gains en résistances pour les GFRP sont proches soit 71% et 95% pour les empilements $(+30/-60)_2$ et $(0/90)_2$ respectivement, cependant, les CFRP donnent un gain de 153%. Mais le meilleur gain enregistré en déformations que ce soit axiale ou radiale est celui obtenu par l'orientation $(0/90)_2$ soit 640% et 6263% respectivement.

3.4 Mode de rupture et d'endommagement

Les faciès de rupture ainsi les différents modes d'endommagement des colonnes en béton de contrôle et celles confinées par les enveloppes composites en CFRP et GFRP ayant les orientations $(0/90)_s$, $(+30/-60)_2$ et $(0/90)_2$ respectivement sont représentés dans la figure 4.

La rupture du béton de contrôle est initiée par des craquements formés sous le plateau supérieur de la presse, avec l'augmentation du chargement, les fissures se développent jusqu'à la rupture par cisaillement. Pour les éprouvettes confinées, l'endommagement est initié par un délaminage entre les enveloppes FRP et le béton ayant pour conséquence le changement de couleur noté sur les photos (la présence du délaminage fait que les photos deviennent plus blanches ; zones les plus endommagées). Ensuite, un développement des fissures est obtenu suivant les directions des fibres alors que la rupture totale des éprouvettes s'effectue par déchirement de l'enveloppe composite dans le sens vertical (c'est-à-dire dans le sens du chargement).



Figure 4. Faciès de rupture des colonnes en béton de contrôle et celles confinées par les enveloppes CFRP et GFRP ayant les orientations $(0/90)_s$, $(+30/-60)_2$ et $(0/90)_2$ respectivement.

4 Conclusion

A la base des résultats obtenus de l'étude portée sur l'évaluation du comportement mécanique en compression uni-axiale des colonnes en béton confinées par des enveloppes en matériaux composites (PRFC et PRFV) extérieurement collées, les conclusions suivantes peuvent être tirées :

➤ L'utilisation du FRP donne une bonne résistance aux déformations dues aux charges axiales, qui résulte d'une concentration des contraintes développées dans le béton, ce qui améliore à la fois la contrainte de compression ultime et la ductilité des colonnes. Les CFRP offrent des augmentations considérables en résistance et en déformations axiale et radiale par rapport aux GFRP.

- La rupture des colonnes confinées par CFRP est marquée par une rupture brutale des fibres et de type ductile pour les GFRP.
- L'étude du comportement des éprouvettes en béton confinées par plis en GFRP orienté à : $(0/90)_2$, $(+30/-60)_2$ et de CFRP $(0/90)_s$ conduit à des augmentations en résistance respectivement jusqu'à 95, 71% et plus de 144% comparativement aux celles de béton de contrôle (non renforcées). Par contre les meilleurs gains en déformations axiale et radiale sont enregistrés pour l'empilement $(0/90)_2$ soit de 640 % et 6260% respectivement. Donc on conclut que l'orientation des fibres a un effet très important sur le comportement des éprouvettes confinées. L'étude montre l'efficacité de cette technique de réparation et conduit à des augmentations des résistances et donne une bonne ténacité aux déformations dues aux charges axiales, qui résultent d'une concentration des contraintes développées dans le béton, ce qui améliore à la fois la contrainte de compression ultime et la ductilité des cylindres.
- La rupture et les modes d'endommagement des colonnes confinées dépendent fortement du type et de la nature de l'enveloppe composite.

Références

- [1] Comité technique AIPCR des Ponts et autres Ouvrages routiers (C11), "Utilisation de matériaux innovants pour la construction et la réparation des ponts". 11.09.B. 2002.
- [2] G. LI, "Effect of fiber orientation on the structural behavior of FRP wrapped concrete cylinders", *Journal of composite structures*, 74 (2006) 475–483.
- [3] T. Zhelyazov, "Renforcement des structures en béton arme par collage de matériaux composites", Thèse de doctorat, Université de Reims Champagne Ardenne, 2008.
- [4] L., Lam, J.G., Teng, "Design-oriented stress–strain model for FRP-confined concrete", *Journal of Construction Building and Materials*, 17 (2003) 471-489.
- [5] V. M., Karbhari, K., Ghosh, "Comparative durability evaluation of ambient temperature cured externally bonded CFRP and GFRP composite systems for repair of bridges" *Journal of Composite: Part A* 40 (2009) 1353-1363.
- [6] V. M., Karbhari, "Fiber reinforced composite bridge systems–transition from the laboratory to the field", *Journal of Composite Structures* 66 (2004) 5-16.
- [7] A., Mirmiran, and M., Shahawy, "Dilation characteristics of confined concrete", *Journal of mechanics of cohesive frictional Materials* 2 (1997) 237-249.
- [8] L A. E. M., Shehata, L. A. V., Carneiro, And L. C. D., Shehata, "Strength of short concrete columns confined with CFRP sheets", *Journal of Materials and Structures* 35 (2002) 50-58.
- [9] S., Zhang, L., Ye Y.W., Mai, "A Study on Polymer Composite Strengthening Systems for Concrete Columns", *Journal of Applied Composite Materials* 7 (2000) 125-138.
- [10] M. N. S., Hadi, "Behaviour of FRP strengthened concrete columns under eccentric compression loading", *Journal of Composite Structures* 77 (2007) 92-96.
- [11] V., Tamuzs, V., Valdmanis, K., Gylltoft, and R., Tepfers, "Behavior of CFRP-confined concrete cylinders with a compressive steel reinforcement", *Journal of Mechanics of Composite Materials* 43 (3) (2007).
- [12] R., Benzaid, N-E., Chikh, H., Mesbah, "study of the compressive behaviour of short concrete columns confined by fiber reinforced composite", *Arabian Journal for Science and Engineering*, 34 (1B) (2009) 15-26.
- [13] M., Shahawy, A., Mirmiran, T., Beitelman, "Tests and modeling of carbon-wrapped concrete columns", *Journal of Composite Part B* 6 (2000) 471-480.