

Conception Optimale des Éléments de Renfort en Composite HFRP des Poutres en Flexion

M. L. Bennegadi¹, Z. Sereir¹, S. Amziane², I. Rekik¹, Y. Hammou³

1. Laboratoire Structures de Composites et Matériaux Innovants (LSCMI), Université des Sciences et de la Technologie Mohamed Boudiaf, BP 1505 El M'Naouer, Oran, Algérie.
2. Polytech Clermont-Ferrand, Université Blaise Pascal, 24 Avenue des Landais - BP 20206 – 63174, Aubière Cedex, France.
3. Département de Génie Maritime, Faculté de Génie Mécanique, Université des Sciences et de la Technologie Mohamed Boudiaf, BP 1505 El M'Naouer, Oran, Algérie.

RESUME—Par la présente étude, une simulation numérique du comportement structurel global des poutres renforcées par plaque en HFRP vis-à-vis des sollicitations de flexion a été effectuée, tout en indiquant les paramètres gouvernant l'efficacité et l'optimisation du volume du renfort. En premier temps, on a tenté d'établir un modèle numérique qui reproduit les principaux résultats d'une étude expérimentale réalisée sur des poutres en béton renforcées par patch en composite, soumises aux sollicitations en flexion. Notre modèle par éléments finis sous environnement ANSYS, nous a donné une bonne concordance avec les résultats expérimentaux, concernant les réponses charges-déplacements. Cette modélisation nous a permis aussi de déterminer les contraintes d'interface aux extrémités de la plaque HFRP. Pour obtenir un volume optimal de la plaque HFRP, deux méthodes d'optimisation sont proposées (méthode d'approximation d'ordre zéro et la méthode du premier ordre). Trois types de variables qui caractérisent le processus de conception doivent se mettre en valeur; il s'agit des variables de conception (variables géométriques), des variables d'état (contraintes ultimes) et la fonction objective (Volume de la plaque HFRP).

Mots clés: *Optimisation, modèle EF, composite, contrainte d'interface*

I. Introduction

De nos jours, il existe principalement deux méthodes de mise en œuvre pour la mise en service des structures en béton armé. La première consiste à démolir la structure puis à la reconstruire entièrement. La seconde consiste à modifier la structure existante en lui ajustant des renforts et plus particulièrement le renforcement par des bandes en matériaux composites FRP ou des supports supplémentaires. Cependant,

l'utilisation de ces matériaux de hautes performances demeure coûteuse et mal maîtrisée, et repose principalement sur l'expérience et des dimensionnements approchés.

Dans le cas des structures complexes, la mise œuvre des éléments de renfort n'est pas évidente et l'expérience ne suffit plus. Dans cette perspective, l'optimisation de conception offre une alternative intéressante. En aboutissant automatiquement à une géométrie optimale du renfort, ce qui minimise la quantité de matériau à utiliser tout en garantissant une contribution maximale du renfort en HFRP. En effet, les processus d'optimisation dépendent de l'aptitude du modèle à décrire les phénomènes physiques qui régissent le fonctionnement de la structure à dimensionner. Dans ce contexte, plusieurs chercheurs [3-6] ont

Corresponding author: Bennegadi M^{ed} El-Larbi
Research field: composite, réparation, structures.
Adresse : Laboratoire Structures de Composites et Matériaux Innovants (LSCMI), USTMBO, BP 1505 El M'Naouer, Oran, Algérie.

E-mail: larbi-68@hotmail.com

énormément investit dans ces méthodes afin de mettre en valeur des différentes techniques d'optimisation et d'analyses numériques permettant aux concepteurs, en un temps de plus en plus réduit, de concevoir les éléments structuraux performants dans le domaine de la mécanique et du génie civil.

Afin de remédier à ce type de problèmes, nous avons proposé cette étude, qui a pour objet la modélisation des poutres renforcées présentant une pré-fissure au joint de collage (défaut cohésif). La poutre renforcée sous une flexion à trois points est discrétisée par la méthode des éléments finis, afin de déterminer l'évolution des contraintes d'interface en présence des défauts cohésifs dans le joint de collage.

En se servant du logiciel ANSYS, un modèle d'élément 3D fini (FE) non linéaire a été développé pour étudier le comportement des poutres et des plaques avec et sans le renfort externe HFRP. En bénéficiant de la symétrie géométrique et des charges, seulement la demi-poutre a été considérée pour la modélisation. La calibration et la validation des résultats obtenus ont été effectuées avec les résultats expérimentaux donnés par la littérature. Par la suite, une optimisation du volume de la plaque HFRP collée en surface sur la poutre en béton a été effectuée avec succès. Pour mener cette optimisation, le volume de la plaque HFRP a été considéré comme fonction objectif. Les variables de conception géométriques sont la hauteur et la largeur de la plaque HFRP tandis que les variables d'état sont les contraintes normales et le déplacement transversal à mi-portée.

II. Discrétisation numérique par ANSYS

II.1. Modèle par éléments finis

Avant l'optimisation de conception du volume de la plaque HFRP, il est nécessaire de développer un modèle numérique de la poutre renforcée par plaque en HFRP et le valider par des essais expérimentaux, dans le souci de vérifier la qualité des résultats obtenus. Dans la littérature [9-12], plusieurs tests expérimentaux ont été largement utilisés comme un moyen d'analyse des éléments structuraux. Bien que ce

soit une méthode qui donne une réponse réelle des états de services de la structure, l'utilisation l'approche expérimentale est avérée très coûteuse qui demande extrêmement de temps et de matériaux. L'apparition des logiciels modernes par EF pour modéliser ces éléments structuraux est beaucoup plus rapide et très rentable. Dans la présente étude, l'élément Solid65 a été utilisé pour modéliser le comportement multilinéaire du béton [8]. L'élément Solid45 a été utilisé pour modéliser les plaques HFRP ainsi que les plaques d'acier qui serviront de supports (appuis) et points de chargement de la poutre. Ces plaques ont un comportement isotrope linéaire [7].

Selon la figure 1, le béton est un matériau quasi fragile avec un comportement très différent en compression et en traction (tableau.1) [7, 8, 11]. Suivant la réglementation, les rapports entre la compression ultime du béton, la contrainte de traction f_r et le module d'élasticité du béton (E_c) sont donnés ci-dessous [1, 2, 5, 14] :

$$E_c = 4700 \sqrt{f'_c} \quad (1)$$

$$f_r = 0.632 \sqrt{f'_c} \quad (2)$$

Avec

$$E_c = \frac{f}{\varepsilon} ; f = \frac{E_c \cdot \varepsilon}{1 + \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}\right)} \text{ et } \varepsilon_0 = 2 \frac{f'_c}{E_c}$$

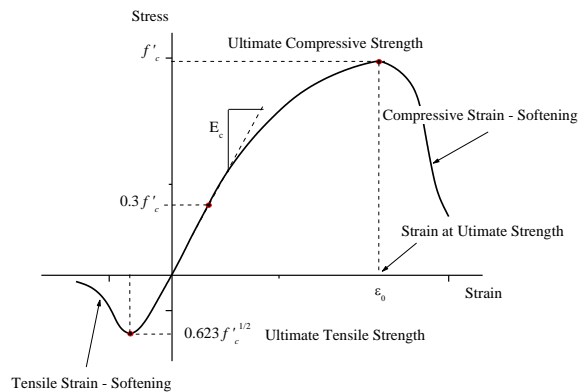


Fig. 1 Courbe type du comportement en compression et traction du béton. [11]

Tableau 1. Propriétés mécaniques du béton

Module de Young E_c (MPa)	Coefficient de Poisson ν_c
29 545	0,2
Contrainte Ultime de traction f_t (MPa)	Contrainte Ultime de Compression f_c (MPa)
3,95	39,1

L'élément Link8a été utilisé pour discrétiser l'armature en acier à comportement parfaitement élasto-plastique (Tableau. 2). La plaque HFRP est modélisée par l'élément Solid45 avec un comportement élastique, parce que pour le calibrage de notre modèle, seul le module d'élasticité équivalent est donné par N. Attari [1, 2] (Tableau. 3).

Tableau 2. Propriétés mécaniques des barres d'acier

Module de Young E_s (MPa)	Coefficient de Poisson ν_s
200 000	0,3
Limite élastique (MPa)	Module Tangent
550	0

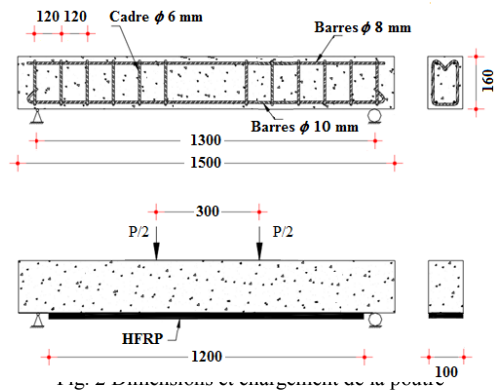
Tableau 3. Propriétés mécaniques de la plaque HFRP

Module de Young E_{HFRP} (MPa)	Coefficient de Poisson ν_{HFRP}
27 000	0,24
Limite élastique (MPa)	Module Tangent
218	0

II.2. Validation du modèle numérique

Dans le cadre de cette présente recherche, un total de deux modèles FE sont développées et les solutions numériques ont été effectuées en corrélation avec les résultats expérimentaux de N. Attari. [1, 2]. Les détails des caractéristiques géométriques sont présentés dans la figure.2.

Pour aboutir à une validation convenable de notre modèle numérique développé sous ANSYS.14, les caractéristiques géométriques et mécaniques ainsi que les conditions de fixation et de chargement sont identiques à l'échantillon de l'approche expérimentale (poutre simplement appuyée en flexion quatre points (Fig. 2).



En raison de la symétrie géométrique, de charges et des conditions aux limites, seulement la demi-longueur des poutres est modélisée. Pour assurer une bonne adhérence entre le béton de la barre d'acier, chaque nœud de l'élément barre est en contact avec un nœud attaché à un élément solide. Pour confondre les nœuds des éléments barres et des éléments solides, la taille de chaque élément a été soigneusement choisie. Cette compatibilité entre les éléments béton et celles des armatures en aciers permis un transfert des charges, des déplacements, des déformations et des contraintes entre les deux types d'éléments (fig. 3). Puisque le béton possède de faibles propriétés mécaniques dans sa partie tractée, les plaques en HFRP sont déposées à la partie inférieure qui subit une traction pendant le chargement de flexion. Ainsi, on aura une compensation de ces contraintes afin d'éviter l'endommagement et la rupture de notre poutre. Un contact parfait d'un point de vue modélisation, doit avoir lieu entre la poutre en béton et la plaque HFRP. Pour cette raison, des éléments de contact ont été placés pour permettre un transfert parfait des sollicitations de la poutre à la plaque. Ce type d'éléments établit une jonction automatique entre deux voisins, l'un du côté plaque et l'autre du côté poutre

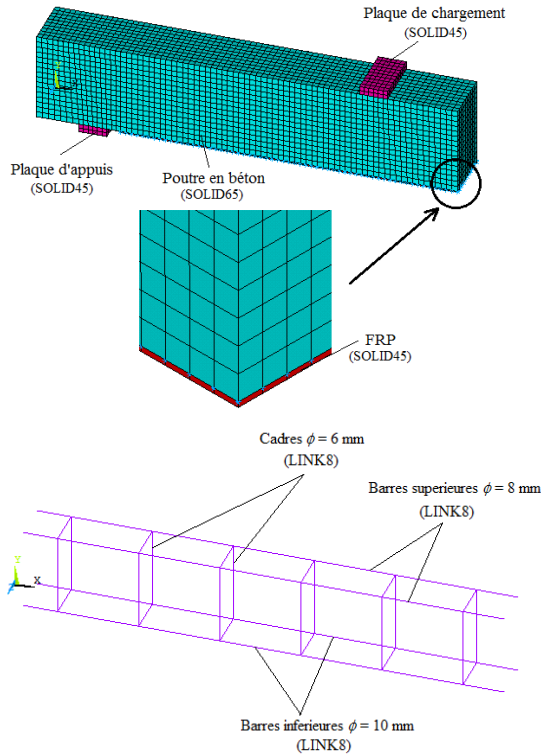


Fig. 3 Maillage de la poutre renforcée par HFRP

A la figure 4, la charge à mi porté de la poutre témoin et la poutre renforcée est présentée en fonction du déplacement imposé. Les courbes charge/déplacement épousent la même la forme avec une légère différence qui apparait surtout pour des valeurs importantes du déplacement imposé. Cette différence est justifiée par le fait que le modèle numérique simule seulement la partie de durcissement, avec une courbe croissante jusqu'a le point de la charge ultime, par contre les résultats expérimentaux sont poursuites jusqu'a le point de rupture totale. Une lecture quantitative des résultats de la poutre témoin, nous montre que pour un déplacement imposé à mi-porté de 19.49 mm, la charge ultime pour le modèle numérique est estimée à 36.57 kN. Pour le même déplacement, cette charge est de 33.79 mm pour le modèle expérimental. Par l'application d'un déplacement imposé maximal (30 mm), la charge donnée par le modèle numérique reste relativement stable (36.96 kN), par contre elle est seulement de 10.66 kN pour le modèle expérimental. Il est remarquable aussi qu'en présence du renforcement, cette charge

ultime atteint de 56.57 kN pour un déplacement ultime de 10.31 mm au lieu de 34.85 kN pour la poutre témoin.

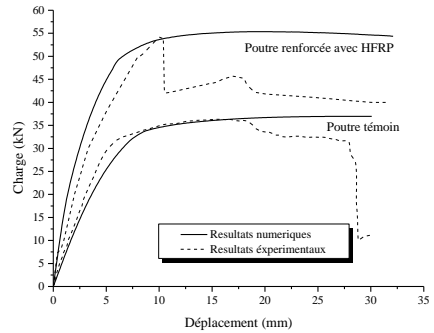


Fig. 4 Comparaison des résultats numériques et expérimentaux avec et sans patch

Pour une meilleure estimation du volume de la plaque FRP, il nous a suffis d'évaluer les paramètres influant sur le comportement global et local de la poutre renforcée. De nombreux travaux ont été publiés dans ce sens. L'évolution des contraintes d'interface aux bords de la plaque HFRP a été présentée à la figure 5. Il est clair que la contrainte normale est proportionnelle avec le chargement de la poutre. De plus, une longueur plus importante de la plaque HFRP engendre aussi de forte concentration des contraintes. Les mêmes concentrations sont faites pour la contrainte de cisaillement, sauf que cette dernière prend des valeurs négatives. Donc, nous pouvons dire que la longueur de la plaque HFRP a un effet très important sur les contraintes d'interfaces.

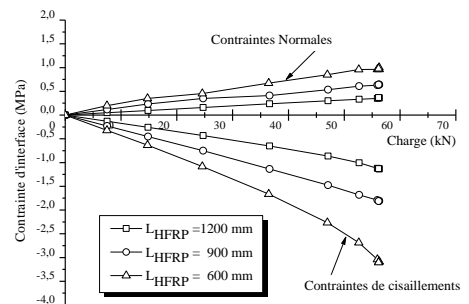


Fig. 5 Contraintes d'interfaces au bord de la plaque en HFRP en fonction du chargement

Pour mettre en valeur l'effet de la variation de l'épaisseur de la plaque HFRP sur l'évolution de la capacité portante (charge appliquée) et des contraintes d'interfaces, nous avons présenté la figure 6. Il est notable que les contraintes d'interfaces sont nettement influencées par la variation de cette épaisseur. Par exemple, la contrainte normale passe de 0.34MPa pour une faible épaisseur ($e_{HFRP}=2$ mm) à 1.5MPa pour une plaque plus épaisse ($e_{HFRP}=6$ mm). Les mêmes constatations sont faites pour la contrainte de cisaillement, où elle passe de -1.1MPa pour une épaisseur de 2 mm à -2.36MPa si cette épaisseur sera de 6 mm.

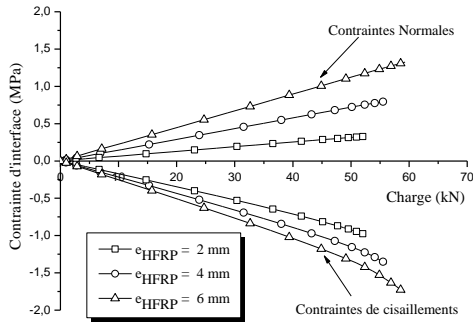


Fig. 6 Contraintes d'interfaces au bord de la plaque en HFRP en fonction du chargement

Cette dernière, nous dévoile clairement que la capacité portante de poutre augmente considérablement avec l'augmentation de l'épaisseur de la plaque HFRP. Donc il n'est pas souhaitable d'augmenter l'épaisseur afin de réduire la plus possible les concentrations de contraintes aux bords de la plaque en FRP.

III. Conception optimale de la géométrie du renfort HFRP

De nos jours, les méthodes numériques d'optimisation sont devenues un outil fiable pour la conception des structures complexes (géométrie, comportement mécanique, etc.). Les diverses méthodes d'optimisation proposées dans la littérature [3, 4, 6, 15] nous permettent de trouver la forme optimale de la structure à faible coût à des conditions de service appropriées. Le concept de l'optimisation est basé sur les formulations

la modélisation paramétrique de la fonction objective, qui peut être le poids, la surface, le volume, les contraintes, le coût, ou d'autres facteurs. Dans le présent modèle, les fondements de la technique d'optimisation sont présentés et illustrés dans le contexte du renforcement de structure.

Pour les deux méthodes d'optimisation utilisées par la procédure d'optimisation APDL (ANSYS Parametric Design Language) sous ANSYS (la méthode d'approximation d'ordre zéro et la méthode du premier ordre [15]), il faut introduire les trois variables qui caractérisent le processus d'optimisation de conception : les variables de conception (DV), les variables d'état (SV) et la fonction objective (OBJ) sont exprimés comme suite :

Minimiser :

Fonction Objective (OBJ) :

$$f = f(x) = V_{HFRP} = L_{HFRP} \cdot b_{HFRP} \cdot e_{HFRP} \quad (3)$$

Objet :

Variables d'état (SV) :

$$\underline{g}_i \leq g_i(x) \leq \bar{g}_i \quad (4)$$

$$\text{où } i = 1, 2, 3, \dots, m_1$$

$$\text{avec } g_i(x) = (U_y, \sigma_y, \tau_{xy})^T$$

Variables de conception (DV) :

$$\underline{w}_i \leq w_i(x) \leq \bar{w}_i \quad (5)$$

$$\text{où } i = 1, 2, 3, \dots, m_2$$

$$\text{avec } w_i(x) = (L_{HFRP}, e_{HFRP})^T$$

où : m_1, m_2 : nombre de variables d'état et de conception.

Afin de minimiser le volume, il est nécessaire de respecter les conditions imposées par les variables d'Etat : déplacement à mi-portée de la poutre et la contrainte normale et de cisaillement sur les bords de la plaque HFRP. Ces paramètres sont évalués en fonction des limites supérieures et inférieures des variables de conception (la longueur L_{HFRP} et l'épaisseur e_{HFRP} de la plaque de renfort) donnés dans le tableau. 4 pour le chargement maximal.

Tableau 4. Les limites supérieures et inférieures des variables de conception et d'État

Variables d'état					
U_y (mm)		σ_y (MPa)		τ_{xy} (MPa)	
\underline{U}_y	\overline{U}_y	$\underline{\sigma}_y$	$\overline{\sigma}_y$	$\underline{\tau}_{xy}$	$\overline{\tau}_{xy}$
32.0	35.0	0.2	0.7	-0.8	-1.2
Variables de conception					
L_{HFRP} (mm)		e_{HFRP} (mm)			
\underline{L}_{HFRP}	\overline{L}_{HFRP}	\underline{e}_{HFRP}	\overline{e}_{HFRP}		
1100	1300	1.0	2.5		

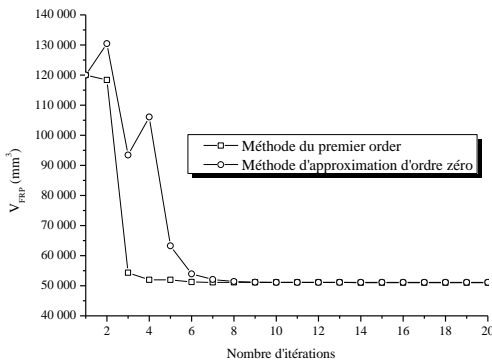


Fig. 7 Evolution de la conception optimale du volume de la plaque FRP en fonction du nombre d'itérations

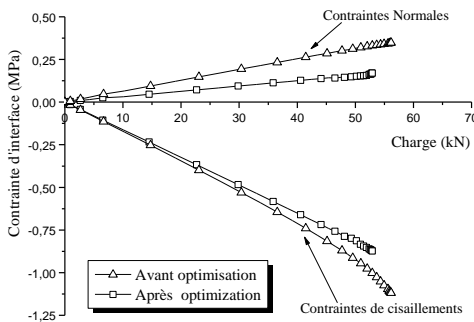


Fig. 8 Courbe contraintes d'interface / charge avant et après optimisation

Une réduction significative du volume de la plaque en HFRP est remarquée, initialement estimé à $V_{HFRP} = 120000 \text{ mm}^3$ et après une dizaine d'itérations le processus d'optimisation converge vers une conception optimale du

volume du renfort FRP estimée à $V_{HFRP} = 51011,2 \text{ mm}^3$ (Fig 7). Cette réduction est très significative de l'ordre de 57%. La figure 8 donne un autre aspect de comparaison, voire l'effet de cette conception optimale du volume sur des contraintes d'interface par rapport à la charge appliquée à la poutre en BA avant et après l'optimisation. Une réduction significative de la contrainte d'interface est observée. A un chargement de 53.32 kN les contraintes normales ont diminué de 0.333 MPa à 0.169 MPa. Cette réduction est très palpable et elle est d'environ 49.25%. Contrairement à l'évolution des contraintes de cisaillement à l'interface où on distingue qu'une légère réduction de ce paramètre estimée de -1.014 MPa à -0.873 MPa, traduite par un rapport de réduction ne dépassant pas les 13.9%.

IV. Conclusion

Cette étude a permis de définir une conception optimisée du volume du renfort HFRP tout en respectant la stabilité structurelle des éléments renforcés. A partir des résultats obtenus, on a constaté que;

- ✓ Les résultats en termes de charge/déplacement du modèle de la poutre témoin et renforcée sont en bon accord avec ceux obtenus expérimentalement avec une légère différence qui apparaît surtout pour des valeurs importantes du déplacement ou de chargement.
- ✓ L'augmentation de l'épaisseur du renfort en FRP conduit à une hausse proportionnelle de la contribution du FRP à la charge appliquée.
- ✓ La contribution du renfort externe en FRP à la capacité portante dépend de la variation de longueur de la plaque HFRP.
- ✓ Les variables de conception sont limitées à des valeurs positives. Il est très important de donner une bonne estimation de la conception initiale.
- ✓ Le processus d'optimisation a permis de réduire considérablement le volume du renfort de surface en HFRP.

References

- [1] Attari, N., Amziane, S., Chemrouk, M., Efficiency of Beam-Column Joint Strengthened by FRP Laminates, *Advanced Composite Materials, Volume 19, Number 2, 2010*, pp. 171-183(13).
- [2] Attari N. Réhabilitation et Renforcement des Poutres et Nœuds en Béton Armé par des Matériaux Composites, Thèse de Doctorat, Thèse soutenue le : 09/07/ 2010, Université de Bretagne Sud, France.
- [3] AitYala A., Megueni A. Optimization of composite patches repairs with the design of experiments method, *Materials and Design* 30, 2009, 200–205.
- [4] Chen H.C, Yeh M.K. Optimum structural design of composite xylophone bars. *16th international conference on composite materials, 2007*.
- [5] Hu H.T, Lin F.M, Jan Y.Y., Nonlinear finite element analysis of reinforced concrete beams strengthened by fiber-reinforced plastics, *Composite Structures* 6, 2004, 271–281
- [6] YAN Y. Design of Structure Optimization with APDL, *Journal of East China Jiaotong University; 2004-04*.
- [7] Hu H. T., Lin F. M. and Jan Y. Y., Nonlinear finite element analysis of reinforced concrete beams strengthened by fiber-reinforced plastics, *Composite Structures* 63, 2004, 271–281
- [8] Kachlakev, D. and T. Miller, FE Modeling of Reinforced Concrete Structures Strengthened with FRP Laminates, Final Report SPR 316, Oregon State University, Department of Transportation, May 2001.
- [9] Malek AM., Saadatmanesh H., Ehsani MR., Prediction of failure load of RC beams strengthened with FRP plate due to stress concentration at the plate end, *ACI Struct J*, 1998; 95(1):142–52.
- [10] Arduini M., Nanni A., Behavior of precracked RC beams strengthened with carbon FRP sheets, *J Compos Construct, ASCE* 1997; 1(2):63–70.
- [11] Mac Gregor, J.G., Reinforced Concrete Mechanics and Design, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, NJ, 1992.
- [12] Triantafillou T.C., Deskovic N., Innovative prestressing with FRP sheets: mechanics of short-term behavior, *J EngMech, ASCE*, 1991; 117(7):1652–72.
- [13] Saadatmanesh H., Ehsani MR., RC beams strengthened with GFRP plates. I. Experimental study, *J StructEng*, 1991; 117(11):3417–33.
- [14] Bangash, M. Y. H., Numerical Modeling and Applications, Concrete and Concrete Structures, 1989.
- [15] ANSYS. User manual - version 12. Canonsburg, (PA, USA).