

Szálerősítésű kompozitok a kutatástól az alkalmazásig – Temesvári tapasztalatok

Fiber Reinforced Polymer Composites from Research to Application – Experiences from Timișoara

Dr. NAGY-GYÖRGY Tamás

Temesvári Műszaki Egyetem, Építőmérnöki Kar, tamas.nagy-gyorgy@upt.ro

Abstract

In 1983, research into the use of Fiber Reinforced Polymer (FRP) composites in construction was initiated in Timișoara, marking the beginning of a sustained scientific effort in this emerging field. Over the past 25 years, this research has led to the formation of a new generation of researchers, evidenced by the successful defense of nine doctoral theses and numerous master's dissertations. The structural application of FRP materials has since evolved significantly, culminating in a broad spectrum of academic and practical achievements. Although several decades ago the widespread and successful use of FRP composites in construction would have seemed unlikely, they have now become vital to modern structural engineering practice. This paper provides a concise overview of the principal outcomes obtained at the Faculty of Civil Engineering, Politehnica University of Timișoara, over the past two decades.

Keywords: strengthening, retrofitting, FRP, masonry, RC walls, slabs, dapped-end beams

Kivonat

Néhány évtizeddel ezelőtt senki sem számított arra, hogy a szálerősítésű polimerek (FRP) ilyen széles körben és ilyen sikeresen kerülnek alkalmazásra az építőiparban, mint manapság. A FRP anyagok építőipari célú felhasználásával kapcsolatos kutatások Temesváron 1983-ban kezdődtek. Az elmúlt 25 év során ez a kutatási tevékenység egy új kutatógenerációt nevelt ki, amelynek eredményeként kilenc sikeresen megvédett doktori disszertáció és számos MSc dolgozat született. E cikk célja, hogy röviden összefoglalja az FRP anyagok szerkezeti alkalmazásával kapcsolatban az elmúlt két évtizedben a Temesvári Műszaki Egyetem Építőmérnöki Karán elért legfontosabb kutatási eredményeket.

Kulcsszavak: megerősítések, FRP, falazatok, vasbeton falak, födémek, kiharapott tartóvégek

1. BEVEZETŐ

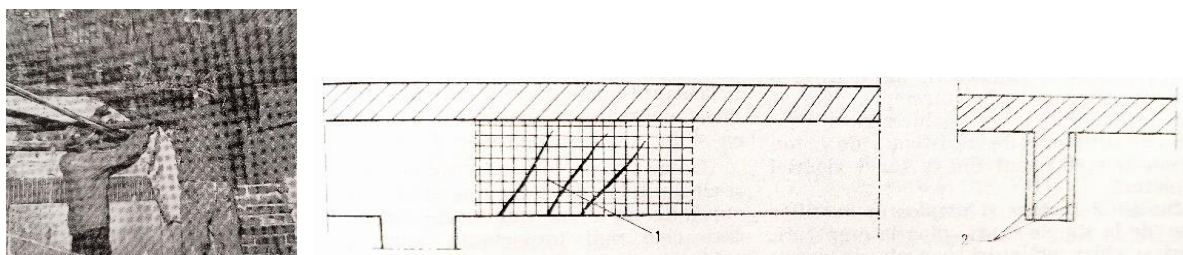
A szálerősítésű kompozitok (FRP) szerkezeti alkalmazásának hatékonyságát az elmúlt két évtizedben számos gyakorlati alkalmazás és kutatás bizonyította és igazolta. E cikk célja, hogy áttekintést nyújtson az elmúlt 25 évben a Temesvári Műszaki Egyetem Építőmérnöki Karán végzett kutatásokról.

Romániában az első dokumentált FRP-kompozitos szerkezetmegerősítési alkalmazás 1978-ban történt, az 1977-es nagy földrengést követően, amikor vasbeton gerendák és falak megerősítésére üvegszál-erősítésű (GFRP) szöveteket alkalmaztak (1. ábra) [1].

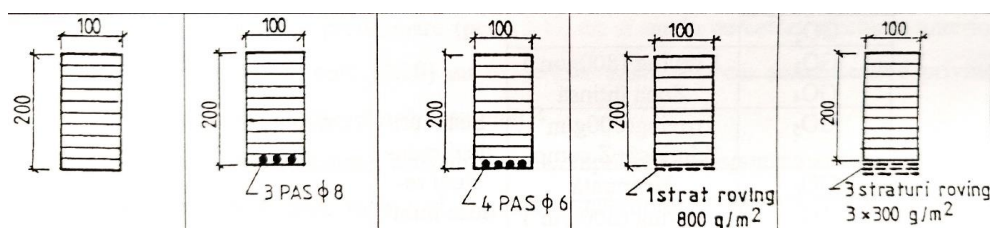
Temesváron a különböző FRP rendszerek szerkezeti alkalmazásával kapcsolatos kutatásokat már 1983-ban dokumentálták, és ezek részét képezték Liana Bob 1999-ben megvédett doktori értekezésének. A kutatás során GFRP anyagokat alkalmaztak külső felületre ragasztott megerősítésként, valamint gerendák felszínközeli rétegébe ágyazott betétek formájában rétegelt ragasztott fa tartók megerősítésére (2. ábra) [2].

Ezen alkalmazásokat követően hosszabb szünet következett ebben a kutatási irányban, mígnem két ([3], [4]), a temesvári Műszaki TDK keretében bemutatott dolgozattal (1999 és 2000), amit egy BSc [5], egy MSc [6] és majd egy PhD dolgozat [7] követett, egy új korszak kezdődött és útjának indult egy nagyobb szabású kutatássorozat. Az utóbbi három munka mindegyikét Balázs L. György és Stoian Valeriu

professzorok irányításával készültek. A cikk további részében az utóbbi 25 év legfontosabb eredményeiből kerül néhány bemutatásra.



1. ábra. Az 1977-es földrengés utáni vasbeton gerendák és falak megerősítése GFRP szövetekkel – helyszíni alkalmazás és megerősítési terv 1978-ból [1]



2. ábra. Rétegelt ragasztott fa gerendák megerősítése GFRP betétekkel NSM és EBR technikák alkalmazásával 1983-ból [2]

2. TÉGLAFALAK NYÍRÁSI MEGERŐSÍTÉSE

A 2000 és 2007 között végzett kutatások célja téglafalazatok nyírási teherbírásának növelése és ezek viselkedésének vizsgálata volt, különböző megerősítési technikák alkalmazásával [8].

A vizsgált megerősítési rendszerek között szerepeltek FRP kompozit rendszerek, hagyományos vashálóval megerősített habarcsok (RMJ), valamint műgyantákkal felragasztott acélhálók (SWM). A nemlineáris numerikus vizsgálatok eredményei alapján egy kísérleti program keretében több mint 20 db, $150 \times 150 \times 25$ cm méretű elem első fázisban tönkremenetelig lett tesztelve, majd megerősítés után újra terhelve, mérve a falak teherbírását, ezek vízszintes elmozdulásait, a megerősítési rendszerek hatékonyságát, megfigyelve a tönkremeneteli módokat is.

Jelentős teherbírás-növekedést volt megfigyelhető minden megerősítési rendszer esetében, viszont a megerősített falak tönkremenetele az alkalmazott rendszertől függően különbözött. Az FRP-val megerősített falaknál a tönkremenetelt a főrepedés erőteljes megnyílása és az ezt követő FRP-leválás okozta. Az RMJ falaknál a tönkremenetelt a nyomott sarkokban a megerősítés leválása, majd egyes vízszintes betétek húzási tönkremenetele eredményezte. Az SWM megerősítés esetén a tönkremenetel a vízszintes és függőleges szálak folyásával kezdődött, majd az átló menti szálak szakadásával következett be, minimális leválás kíséretében. A megerősített falak maximális vízszintes elmozdulásai legalább kétszeresére nőttek a referencia-próbatestekhez képest, ami a duktilitás és az energiaelnyelő képességek javulását igazolta.

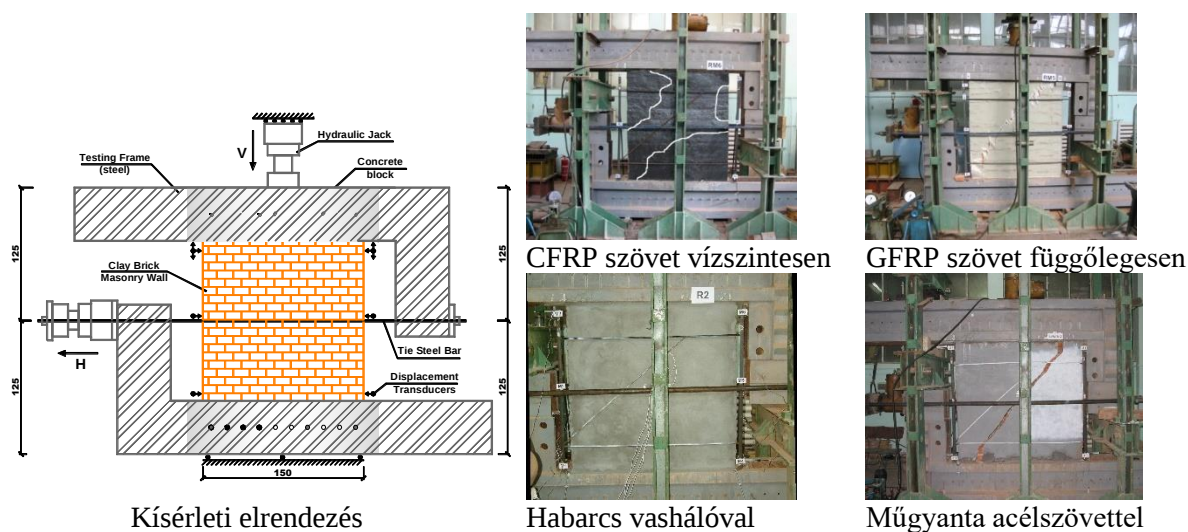
A teherbírás növelése szempontjából a legelőnyösebb megerősítési rendszer a SWM rendszer volt, míg az alkalmazási sebességet tekintve az FRP rendszer bizonyult a leggyorsabbnak. Az RMJ rendszer viszont a legolcsóbbnak (anyag- és kivitelezési költségeket tekintve), valamint a leghatékonyabbnak is, ha az elért maximális teherbírás és a kivitelezési költségek arányát vesszük alapul.

3. VASBETON FALAK NYÍRÁSI MEGERŐSÍTÉSE

Az eltolt elrendezésű nyílásokkal rendelkező falakon végzett tanulmány célja az volt, hogy kísérletileg vizsgálja ezen szerkezeti elemek viselkedését [9], valamint felmérje a (szénszálas) CFRP kompozit anyagok hatékonyságát ezen falak szeizmikus megerősítésében. A kutatás során a megerősített elemek viselkedése, egy speciális lehorgonyzási részlet, a megerősítési rendszer kialakítása, a merevség és képlékenység változásai, valamint a tönkremeneteli mechanizmusok lettek vizsgálva [10]. Öt darab 1:4 méretarányú, lamella-típusú vasbeton fal került tesztelésre, 1 fal monoton, 4 pedig ciklikus terhelésnek alávetve, egészen tönkremenetelig. A kísérleti lépés következő fázisában a falak CFRP kompozitokkal lettek egyik oldalukon

mege erősítve. A felhasznált egyirányú szövetek egy akkor kifejlesztett lehorgonyzási módszerrel kerültek kialakításra, amely később, az fib Bulletin 90-ben is hivatkozott módon, rendkívül hatékonynak bizonyult. Következtetésként megállapítható volt, hogy a falak rugalmas határa átlagosan 47%-kal nőtt, míg a tönkremeneteli teherbírás átlagosan 45%-kal emelkedett. Valamennyi próbatest esetében hasonló tönkremeneteli mód volt megfigyelhető: előbb a nyomott zónában az FRP kompozit leválása (kihajlással) következett be, amit túlzott repedésnyílások, majd az FRP húzási vagy nyomási tönkremenetele követek.

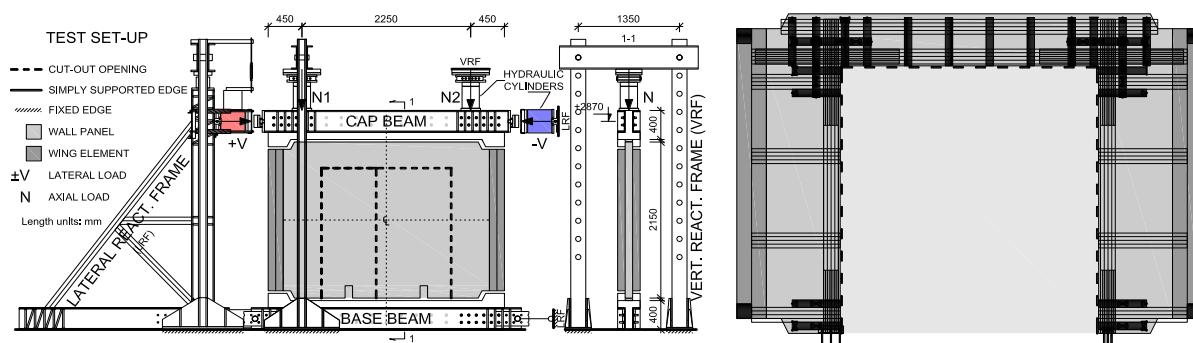
A fenti kutatási program folytatásaként olyan előregyártott vasbeton falelemek földrengésállósági vizsgálata következett, melyeken új nyílások kerültek kialakításra. Az előidézett teherbírás-csökkenés felmérése és a szálerősítésű kompozitokkal történő megerősítési módszer hatékonyságának vizsgálata egy kísérleti program keretén belül történt. A program első részében egy adatbázis került összeállításra, elemezve az előregyártott lakóépületek méreteit, kialakításait, majd vizsgálva a falszerkezetek megerősítési módszereit és ezek hatékonyságait, tesztelési formáit, eredményeit. A Temesváron végzett laboratóriumi kísérleti elemek méretei, vasalásuk, illetve anyagjellemzői kiindulópontjaként egy valós, 1982-ből származó, títusterv szolgált. Kezelhetőségi és a laboratóriumi tesztelési kapacitás figyelembevételével, az elemek 1:1.2 méretarányban voltak kicsinyítve a valódi panelekhez képest. A kísérleti változók szerepét a nyílások mérete, illetve természete és a megerősítési állapot töltötték be. A vizsgálatok három szinten struktúráltak. Az első szintet egy tömör (kivágás nélküli) fal képviseli, amely referenciaelemként szolgált. A második szint két olyan tömör falat tartalmazott, amelyek kivágott nyílásokat tartalmaznak, de minden más tekintetben megegyeztek a referenciafallal. A különbség ezek között az elemek között az ajtónyílás szélessége volt. A harmadik szint két pár megerősített elemből áll, amelyek a második szint falainak felelnek meg. A nyílásméret mellett a különbség ezek között, hogy egy-egy elem tesztelés előtt, míg a másik kettő utólag került megerősítésre. A kutatás következtetései alapján megállapítható, hogy az FRP kompozitokkal megerősített falak teherbírása és elmozdulási képessége növekedett a földrengés előtti, megerősítetlen elemhez képest, továbbá energiaelnyelő képességük is jelentősen megnőtt, míg más válaszpáraméterek kisebb mértékben változtak. [11]



3. ábra. FRP kompozitokkal megerősített téglafal próbatestek [7]



4. ábra. FRP kompozitokkal megerősített vasbeton faelemek és a lehorgonyzási zóna részlete [7]



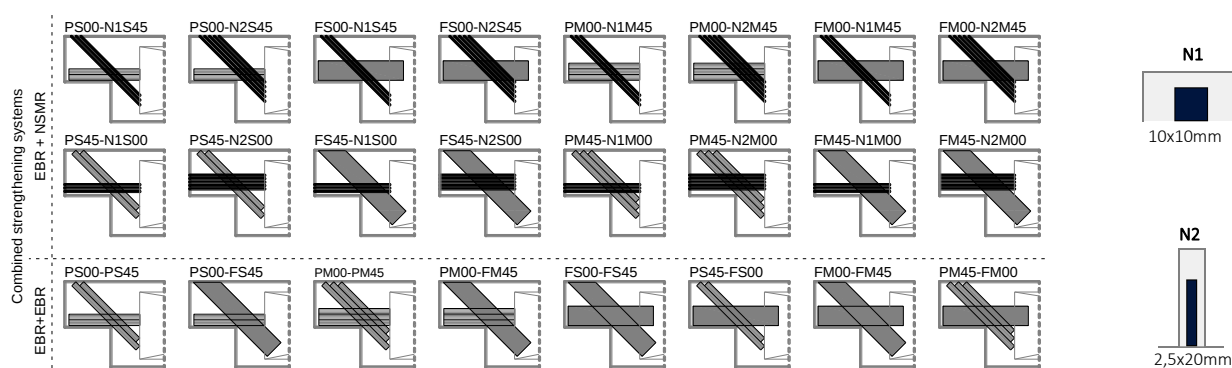
5. ábra. A kísérleti elrendezés és egy példa kivágott ajtónyílású fal megerősítésére [11]

4. KIHARAPOTT TARTÓVÉGEK MEGERŐSÍTÉSE

A kiharapott tartóvégek viselkedése igen összetett, tervezési vagy kivitelezési hibák esetén megerősítésük komplikált, hozzáértést és tapasztalatot igényel. A következőkben röviden bemutatandó kutatási eredmények egy valós alkalmazásból adódtak. Nemzetközi szakirodalomban csak néhány kisebb méretű FRP-vel megerősített gerendavégen végzett kísérleti eredmény volt elérhető, de ezek mindegyike hatékonynak bizonyultak.

A Temesváron végzett kutatások első szakaszában kísérleti és numerikus módszerek segítségével lett felmérve a kiharapott végű gerendák CFRP-kkel történt megerősítésének hatékonysága. A kísérleti szakaszban négy hasonló próbatestet került vizsgálatra: egy referenciaelem, két nagyszilárdságú CFRP lamellával, valamint egyet nagy modulusú CFRP szövetekkel megerősített. A nemlineáris végelem-analízisek jól visszaadták a valós viselkedést, tönkremeneteli módot, teherbírást [12].

A második szakaszban parametrikus nemlineáris végelemes modellezéssel történő vizsgálatok következtek annak érdekében, hogy meghatározhatók legyenek a leghatékonyabb megerősítési kialakítások. Összesen 24 különböző felületi (EBR) és felületközeli (NSM) megerősítési konfiguráció lett összehasonlítva, figyelembe véve az acélbetét folyáshoz tartozó alakváltozását, a teherbírást és a tönkremeneteli módokat. A vizsgált paraméterek a következők voltak: a CFRP mechanikai tulajdonságai, a megerősítés típusa (EBR vagy NSM) és a szálak a gerenda hosszanti tengelyével bezárt szöge. Két lehetséges tönkremeneteli mód lett elemelve: az FRP anyag szakadása és a tapadásvesztést (debonding). Az eredmények alapján a nagy szilárdságú NSM FRP megerősítések jelentősen növelhetik a kiharapott gerendavégek teherbírását, míg a nagymodulusú szénzálak alkalmazásával az acélbetétekben kialakuló folyási alakváltozások lényegesen csökkenthetők [13].



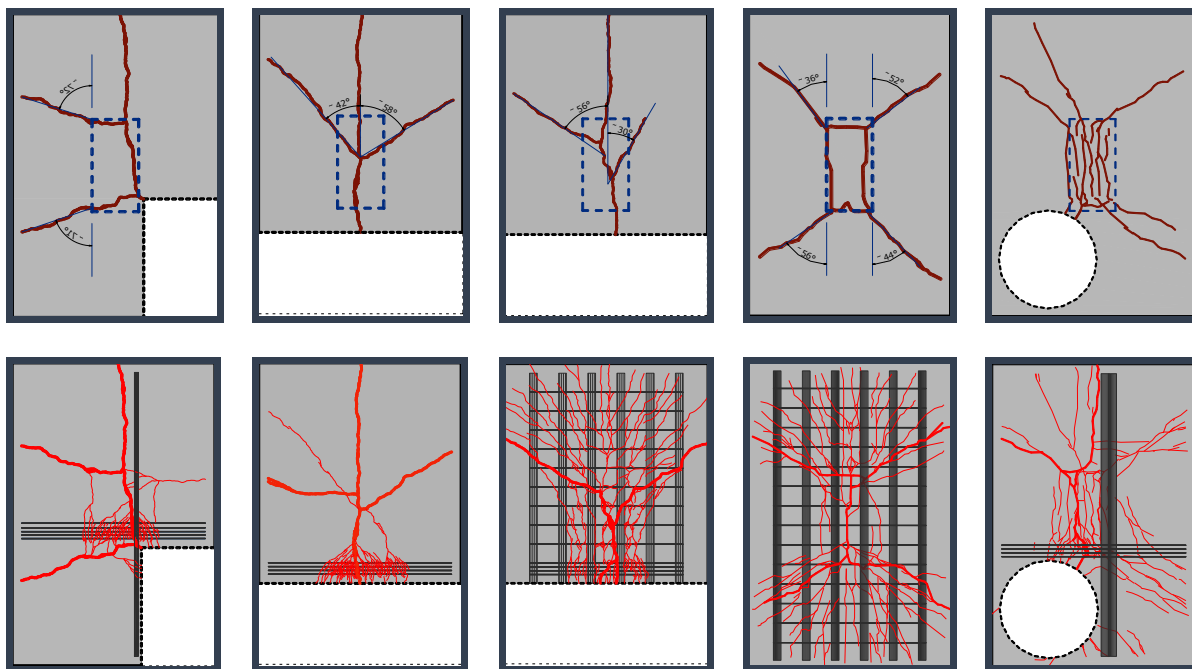
6. ábra. Kiharapott gerendavégek vizsgált megerősítési módjai [13]

5. VASBETON FÖDÉMEK MEGERŐSÍTÉSE

Az elméleti és kísérleti program célja az volt, hogy felmérje a kivágásokkal gyengített és FRP kompozitokkal megerősített vasbeton födémek viselkedését. A kísérleti program valós méretű, kétirányban teherhordó vasbeton lemezek teszteléséből állt. Minden próbatest két lépésben lett vizsgálva: az eredeti (épített) állapotban, egy olyan terhelési szintig, amely megerősítést indokolt volna, majd a megerősítés alkalmazása után egészen tönkremenetelig. Az alkalmazott megerősítés egy hibrid technika volt, amely a

felületközeli (NSM) FRP és a felülete ragasztott (EBR) FRP technológiákat kombinálta. Összesen tizenkét teszt került elvégzésre kiértékelés céljából.

Az eredmények egyértelműen bizonyították a javasolt megerősítési módszerek hatékonyságát: a meggyengült lemezek teherbírása könnyen visszaállítható volt vagy akár növelhető is a megfelelő megerősítési elrendezés alkalmazásával. A repedéseképek azt mutatták, hogy a megerősített elemeknél jelentősen nagyobb számú, de kisebb repedéstágasságú repedés keletkezett, mint a referenciaelemeknél, ami a kedvezőbb viselkedésre utal. A javasolt egyszerűsített analitikus számítási módszer alkalmazása gyors és megbízható eredményeket produkált [14].



7. ábra. A megerősítés nélküli és az FRP kompozitokkal megerősített födécek repedéseképei [14]

6. KÖVETKEZTETÉSEK

A fent bemutatott kutatási eredmények egyértelműen rávilágítanak arra, hogy mekkora potenciálja van a FRP kompozitok alkalmazásának vasbeton és falazott szerkezetek megerősítésére. Az itt bemutatott megoldások mind hatékonyak bizonyultak és számos esetben kerültek alkalmazásra.

A terjedelmi korlátok miatt nincs lehetőség részletezni további kutatási programok eredményeit, mint például: a felületközeli acélbetétek és a felületre ragasztott FRP kompozitok együttes alkalmazását, az FRP kompozitokhoz kifejlesztett különféle lehorgonyzási rendszereket, vasbetonfalak összekötő gerendáinak megerősítését.



Tégla falak megerősítés
Újmoldova (2003)

Vasbeton falak, födécek és gerendák megerősítése
Temesvár (2003)

8. ábra. FRP kompozitokkal végzett megerősítések korai példái



*Oszlopmegerősítés
Nagybánya (2003)*



*Keretszerkezet megerősítése
Temesvár (2010)*



*Kivágott födémek megerősítése
Temesvár (2007)*

9. ábra. FRP kompozitokkal végzett további megerősítések példái

IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- [1] Balan St., Cristescu V. and Cornea I., The 1977 March 4 Earthquake in Romania, (in Romanian), Editura Academiei, Bucharest, 1982.
- [2] Bob L., *Contributions regarding the use of composite elements for the realization of structures*, PhD thesis, Timisoara, Romania, 1999.
- [3] Nagy-György T., *Structural retrofitting an existing precast RC slab using CFRP composites*, Scientific Student Conference – Timișoara, Romania, 1999.
- [4] Nagy-György T., *Strengthening RC structural element using FRP composites*, Scientific Student Conference – Timișoara, Romania, 2000.
- [5] Nagy-György T., *Attic construction using different structural materials by retrofitting the existing structure*, BSc thesis, Politehnica University Timișoara, Romania, 1999.
- [6] Nagy-György T., *Strengthening RC Beams for Bending and Shear Using FRP Composite Materials*, MSc thesis, Politehnica University Timișoara, June, 2001.
- [7] Nagy-György T., *Using FRP Composite Materials for Strengthening Brick Masonry and Reinforced Concrete Elements*, Ph.D. Thesis, Politehnica University of Timișoara, Romania, 2004.
- [8] Nagy-György T., Stoian V., Dan D., *Strength and Economic Assessment of Different Retrofitting Methods for Shear Deficient Masonry Walls of Heritage Structures*, Third International Workshop on Civil Structural Health Monitoring (CSHM-3), Ottawa, Canada, 2010.
- [9] Moșoarcă M. (2004), *Contributions in design and detailing of reinforced concrete structural walls*, Ph.D. Thesis, Politehnica University of Timișoara, Romania, 2004
- [10] Nagy-György T., Stoian V., Dan D., Dăescu C., Diaconu D., Sas G., Moșoarcă M., *Research Results on RC Walls and Dapped Beam Ends Strengthened with FRP Composites*, FRPRCS-8, Patras, Greece, 2007
- [11] Demeter I., *Seismic retrofit of precast RC walls by externally bonded CFRP composites*, PhD Thesis, Politehnica Publishing House, Timișoara, Romania, 2011
- [12] Nagy-György T., Sas G., Dăescu C., Barros J.A.O., Stoian V., Experimental and numerical assessment of the effectiveness of FRP-based strengthening configurations for dapped-end RC beams, *Engineering Structures* 44 (2012) 291-303, ISSN: 0141-0296. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2012.06.006>
- [13] Sas G., Dăescu C., Popescu C., Nagy-György T., Numerical optimization of strengthening disturbed regions of dapped-end beams using NSM and EBR CFRP, *Composites Part B: Engineering* 67 (2014), 381-390, ISSN: 1359-8368. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2014.07.013>
- [14] Floruț S. C., *Performance study of elements strengthened with FRP composite materials subjected to flexure*, PhD Thesis, Ed. Politehnica, Timisoara, Romania, 2011.