

**STRENGTH AND CRACK RESISTANCE OF BASALT FIBER-  
STRENGTHENED REINFORCED CONCRETE BEAMS WITH  
COMPOSITE REINFORCEMENT: A COMPARATIVE ANALYSIS  
BASED ON EUROCODE 2**

**Muxtorova Shahzoda Shokirjon qizi**

Fergana State Technical University, Faculty of Architecture and Construction Master's  
student of group M2-25 QM

Scientific supervisor: **Nazirov Ayubxon Sultonjon o'g'li**  
Senior Lecturer, Department of Construction Materials (QM),  
Fergana State Technical University

**Abstract:**

This paper presents a theoretical analysis of the strength and crack resistance of flexural reinforced concrete beams reinforced with composite FRP bars and strengthened by basalt fibers. Although FRP reinforcement provides high tensile strength and excellent corrosion resistance, its relatively low modulus of elasticity compared to steel reinforcement leads to increased deflections and crack widths, which is considered a key serviceability limitation. The incorporation of basalt fibers into concrete is examined as an effective method to improve crack resistance by acting as micro-reinforcement, bridging microcracks and limiting crack propagation. Furthermore, the Eurocode 2 crack width calculation approach is reviewed and compared with the structural behavior of FRP reinforced concrete members. Based on the reviewed literature, the combined use of basalt fibers and FRP reinforcement is identified as a promising solution for

enhancing serviceability performance, durability, and long-term reliability of reinforced concrete beams in aggressive environments.

**Keywords:** basalt fiber, FRP reinforcement, composite rebar, reinforced concrete beam, flexural behavior, crack resistance, strength, deflection, Eurocode

**Annotatsiya:** Ushbu maqolada basalt fibra bilan mustahkamlangan hamda kompozit armatura (FRP) bilan armaturalangan egilishga ishlovchi temir-beton to'sinlarning mustahkamligi va yoriqbardoshligi nazariy jihatdan tahlil qilinadi. FRP armaturalarning yuqori tortilish mustahkamligi va korroziyaga chidamliligi kabi afzalliklariga qaramasdan, ularning elastiklik moduli po'lat armaturaga nisbatan past bo'lgani sababli egilish deformatsiyalari va yoriq kengliklari ortishi muammo sifatida qaraladi. Ushbu kamchiliklarni kamaytirishda basalt fibra beton tarkibida mikroarmatura vazifasini bajarib, yoriqlarning hosil bo'lishi va rivojlanishini cheklashi asoslab beriladi. Shuningdek, Eurocode 2 me'yoriy hujjati bo'yicha yoriq kengligini aniqlash metodikasi keltiriladi hamda FRP armaturali elementlarda ushbu yondashuvni qo'llashdagi farqli jihatlar tahlil qilinadi. Adabiyotlar sharhi natijalariga ko'ra basalt fibra va FRP armatura kombinatsiyasi temir-beton to'sinlarning xizmat holati ko'rsatkichlarini yaxshilash, yoriqbardoshlikni oshirish va ekspluatatsion ishonchlikni ta'minlashda istiqbolli yechim hisoblanadi.

**Kalit so'zlar:** basalt fibra, FRP armatura, kompozit armatura, temir-beton to'sin, egilish, yoriqbardoshlik, mustahkamlik, deformatsiya, Eurocode 2.

Kirish

Hozirgi kunda temir-beton konstruksiyalarni loyihalashda nafaqat mustahkamlikni, balki uzoq muddatli ekspluatatsion holatni ta'minlash ham muhim talab hisoblanadi.

Temir-beton inshootlarning asosiy muammolaridan biri po'lat armaturaning korroziyaga uchrashi bo'lib, bu jarayon beton qoplamaning yorilishi, armatura kesimining kamayishi va natijada elementning yuk ko'tarish qobiliyatining

pasayishiga olib keladi. Ayniqsa nam muhit, sho‘rlangan tuproq yoki kimyoviy agressiv sharoitda ishlovchi inshootlarda korroziya jarayoni tezlashadi va xizmat muddati keskin kamayadi.

Shu sababli zamonaviy qurilish amaliyotida po‘lat armaturaga alternativ sifatida kompozit armaturalar, jumladan shisha tolali (GFRP), basalt tolali (BFRP) va uglerod tolali (CFRP) armaturalar keng qo‘llanilmoqda. Ushbu armaturalarning asosiy afzalligi korroziyaga chidamliligi, yengil vazni va yuqori tortilish mustahkamligi bilan izohlanadi.

Biroq FRP armaturalarning elastiklik moduli po‘lat armaturaga nisbatan sezilarli darajada kichik bo‘lgani sababli egilishga ishlovchi temir-beton elementlarda deformatsiya ortishi va yoriq kengligining oshishi kuzatiladi. Bu holat xizmat holati (serviceability limit state) bo‘yicha normativ talablarni qondirishni murakkablashtiradi.

Ushbu muammoni kamaytirishning istiqbolli yo‘nalishlaridan biri beton tarkibiga basalt fibra qo‘shish orqali betonning tortilish zonasidagi ish qobiliyatini oshirishdan iborat. Basalt fibra beton ichida dispers armatura vazifasini bajarib, yoriqlar hosil bo‘lishini kechiktiradi, yoriqlar kengligini kamaytiradi hamda betonning yorilishga chidamliligini oshiradi.

Mazkur maqolada basalt fibra bilan mustahkamlangan FRP armaturali temir-beton to‘sinlarning mustahkamligi va yoriqbardoshligi bo‘yicha mavjud ilmiy yondashuvlar tahlil qilinadi hamda Eurocode 2 me‘yoriy hujjati asosida solishtirma baholash keltiriladi.

## 2. Adabiyotlar tahlili

So‘nggi yillarda FRP armaturali temir-beton elementlarning mexanik xususiyatlari bo‘yicha ko‘plab tadqiqotlar olib borilgan. Tadqiqotlar shuni ko‘rsatadiki, FRP armatura bilan armaturalangan elementlarda yoriqlanish jarayoni po‘lat armaturali

elementlarga nisbatan tezroq sodir bo‘ladi. Bu holat FRP armaturaning elastiklik moduli pastligi bilan izohlanadi.

ACI 440 va fib Model Code tavsiyalariga ko‘ra FRP armaturali elementlarda mustahkamlikdan ko‘ra ko‘proq xizmat holati mezonlari – deformatsiya va yoriq kengligini nazorat qilish muhimroq hisoblanadi. Shuningdek, FRP armatura mo‘rt buzilish xarakteriga ega bo‘lib, deformatsiya bo‘yicha ogohlantirishsiz uzilishi mumkin.

Basalt fibra bilan mustahkamlangan beton bo‘yicha tadqiqotlarda esa basalt tolalar betonning yorilishga chidamliligini oshirishi, mikro yoriqlarni bog‘lab turishi va betonning energiya yutish qobiliyatini oshirishi qayd etilgan. Basalt fibra qo‘shilgan betonlarda yoriqlar soni ortadi, ammo yoriqlar kengligi sezilarli darajada kamayadi. Adabiyotlar tahlili shuni ko‘rsatadiki, FRP armatura va basalt fibra kombinatsiyasi yoriqbardoshlikni oshirish hamda deformatsiyani kamaytirish bo‘yicha samarali yechim hisoblanadi.

### 3. Kompozit armaturaning egilishga ishlovchi elementlardagi xususiyatlari

FRP armaturaning po‘lat armaturadan asosiy farqlari quyidagilar bilan tavsiflanadi:

Elastiklik moduli pastligi: po‘lat armaturada taxminan 200 GPa, GFRP armaturada esa odatda 40–60 GPa atrofida.

Mo‘rt buzilish: FRP armatura plastiklikka ega emas, oqish bosqichi kuzatilmaydi.

Korroziyaga chidamlilik: agressiv muhitlarda yuqori barqarorlik.

Yengil vazn: transport va montaj jarayonlarini yengillashtiradi.

Egilishga ishlovchi temir-beton to‘sinlarda yoriqlanish tortilish zonasida boshlanadi.

Po‘lat armaturali elementlarda armatura elastik-plastik xususiyatlari tufayli deformatsiya jarayoni bosqichma-bosqich rivojlanadi. FRP armaturali elementlarda esa deformatsiya tez ortib, yoriqlar kengligi katta bo‘lishi mumkin.

Shuning uchun FRP armatura bilan armaturalangan to‘sinlarda yoriqbardoshlik va deformatsiyani cheklash dolzarb masala bo‘lib qolmoqda.

Basalt fibraning beton tarkibidagi ro‘li - Basalt fibra tabiiy vulqon jinslaridan olinadigan tolali material bo‘lib, beton tarkibida dispers armatura vazifasini bajaradi. Basalt tolalarining mexanik xususiyatlari yuqori bo‘lib, ularning beton ichida tarqalishi betonning cho‘zilish zonasidagi kuchlanishlarni qayta taqsimlash imkonini beradi.

Basalt fibra betonning quyidagi xususiyatlarini yaxshilaydi:

betonning yorilishga chidamliligi oshadi;

yoriqlarning rivojlanish tezligi pasayadi;

yoriq kengligi kamayadi;

betonning energiya yutish qobiliyati ortadi;

deformatsiya jarayoni barqarorlashadi.

Basalt fibra beton ichida “ko‘prik effekti” (bridging effect) hosil qilib, mikro yoriqlarni birlashtirib turadi va ularning katta yoriqqa aylanishiga to‘sqinlik qiladi. Bu esa FRP armaturali to‘sinlarda xizmat holatini yaxshilashda muhim rol o‘ynaydi.

Basalt fibra va FRP armatura kombinatsiyasining samaradorligi - FRP armaturali temir-beton to‘sinlarda deformatsiya va yoriqlanish muammosi betonning tortilish zonasida tez yorilishi bilan bog‘liq. Basalt fibra qo‘shilganda betonning tortilish zonasida qo‘shimcha mustahkamlik hosil bo‘ladi.

Ushbu kombinatsiya natijasida quyidagi samaralar kuzatiladi:

birinchi yoriq hosil bo‘lishi kechikadi;

yoriqlar soni ortadi, lekin yoriqlar kengligi kamayadi;

to‘sinning egilish deformatsiyasi kamayadi;

elementning yorilishdan keyingi qattiqligi nisbatan yuqoriroq saqlanadi;

mo‘rt buzilish xavfi kamayadi.

Demak, basalt fibra FRP armaturali elementlarda xizmat holati ko'rsatkichlarini yaxshilovchi qo'shimcha mustahkamlovchi komponent sifatida qaraladi.

Eurocode 2 bo'yicha yoriq kengligini hisoblash (Crack Width Calculation According to Eurocode 2)

Eurocode 2 (EN 1992-1-1) me'yoriy hujjatida yoriq kengligini aniqlash uchun quyidagi asosiy formula beriladi:

$$w_k = s_{r,max}(\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm})$$

bu yerda:

$w_k$  – xarakterli yoriq kengligi (mm);

$s_{r,max}$  – maksimal yoriqlar oralig'i (mm);

$\epsilon_{sm}$  – armaturaning o'rtacha deformatsiyasi;

$\epsilon_{cm}$  – betonning o'rtacha deformatsiyasi.

Eurocode 2 bo'yicha maksimal yoriqlar oralig'i quyidagicha ifodalanadi:

$$s_{r,max} = k_{3c} + k_1 k_2 k_4 (\phi / \rho_p, eff \phi)$$

bu yerda:

$c$  – beton qoplama qalinligi (mm);

$\phi$  – armatura diametri (mm);

$\rho_p, eff$  – samarali armaturalash koeffitsiyenti;

$k_1, k_2, k_3, k_4$  – empirik koeffitsiyentlar.

Eurocode 2 formulalari po'lat armaturali temir-beton elementlar uchun ishlab chiqilgan bo'lib, FRP armaturali elementlarda elastiklik moduli farqi sababli deformatsiya ko'rsatkichlari o'zgaradi.

7. Eurocode 2 va FRP armatura yondashuvlarini solishtirish (Comparison of Eurocode 2 and FRP-Based Design Approaches)

Eurocode 2 asosan po‘lat armatura uchun mo‘ljallangan bo‘lib, armaturaning plastiklik xususiyatiga tayanadi. FRP armatura esa elastik va mo‘rt buzilish xususiyatiga ega.

Solishtirma jihatlar

#### 1. Elastiklik moduli farqi

Po‘lat armaturada  $E_s \approx 200$  GPa, FRP armaturada esa  $E_{frp}$  odatda 40–70 GPa. Bu holat deformatsiyani oshiradi.

#### 2. Yoriq kengligi

Eurocode 2 formulalarida yoriq kengligi armatura deformatsiyasiga bog‘liq. FRP armaturada deformatsiya katta bo‘lgani sababli:

$$W_{FRP} > W_{Steel}$$

#### 3. Deformatsiya nazorati

Eurocode 2 bo‘yicha deformatsiya inertsia momentining o‘zgarishi asosida baholanadi. FRP armaturali elementlarda yoriqlanishdan keyingi qattqlik keskin pasayadi.

#### 4. Buzilish xarakteri

Po‘lat armaturada avval armatura oqadi, keyin beton eziladi. FRP armaturada esa uzilish birdan sodir bo‘ladi.

Shuning uchun FRP armaturali elementlarda xizmat holati bo‘yicha hisoblashlar kuchaytirilgan nazoratni talab qiladi.

#### 8. Basalt fibra qo‘shishning Eurocode 2 nuqtai nazaridan ta’siri (Effect of Basalt Fibers in Terms of Eurocode 2 Serviceability Requirements)

Eurocode 2 bo‘yicha yoriq kengligi quyidagi asosiy omillarga bog‘liq:

yoriqlar oralig‘i  $s_r, max$ ,

armatura deformatsiyasi  $\epsilon_{sm}$ ,

beton deformatsiyasi  $\epsilon_{cm}$ .

Basalt fibra beton tarkibida mikroarmatura sifatida ishlagani sababli yoriqlar oralig‘i kamayishi hamda betonning tortilish zonasidagi deformatsiyasi oshishi mumkin. Bu holat:

$$W_{k=S_{r,max}}(\varepsilon_{sm}-\varepsilon_{cm})$$

ifodasida  $s_{r,max}$  kamayishiga olib keladi va natijada yoriq kengligi pasayadi.

Shuningdek, basalt fibra yoriqlanishdan keyingi betonning ish qobiliyatini saqlab qoladi. Bu esa FRP armaturali to‘sinlarda deformatsiyani kamaytiruvchi muhim omil bo‘lib xizmat qiladi.

Mustahkamlikka ta’siri. Egilishga ishlovchi temir-beton to‘sinlarning mustahkamligi asosan betonning siqilish zonasidagi mustahkamligi hamda armaturaning tortilish zonasidagi ish qobiliyatiga bog‘liq. FRP armatura yuqori tortilish mustahkamligiga ega bo‘lsa-da, uning elastiklik moduli pastligi sababli yoriqlanishdan keyingi bosqichda deformatsiya ortadi. Basalt fibra esa betonning tortilish zonasida qo‘shimcha mustahkamlik hosil qilib, elementning ish rejimini yaxshilaydi. Adabiyotlarda basalt fibra qo‘shilgan betonning egilishga mustahkamligi va yorilishga chidamliligi oshishi qayd etilgan. Shu sababli basalt fibra FRP armaturali elementlarda mustahkamlikni oshirishdan ko‘ra ko‘proq xizmat holatini yaxshilashga ta’sir qiladi.

Yoriqbardoshlik va deformatsiya nazorati. FRP armaturali elementlarda yoriqlar kengligi katta bo‘lishi, deformatsiya esa normativ qiymatdan oshib ketishi mumkin. Basalt fibra qo‘shilganda yoriqlar soni ko‘payadi, lekin ularning kengligi kamayadi. Bu holat yoriqlanishni yanada barqaror qiladi.

Bunday elementlarning asosiy afzalligi shundaki, basalt fibra va FRP armatura kombinatsiyasi:

yoriq kengligini cheklaydi,  
deformatsiyani kamaytiradi,

elementning ekspluatatsion barqarorligini oshiradi.

Nazariy tahlillar shuni ko'rsatadiki, FRP armaturali temir-beton to'sinlarning mustahkamligi ko'pincha yuqori bo'lsa-da, ularning xizmat holati ko'rsatkichlari (deformatsiya va yoriq kengligi) cheklovchi omil hisoblanadi. Eurocode 2 yondashuvi po'lat armatura uchun ishlab chiqilgan bo'lib, FRP armatura qo'llanilganda deformatsiya ortishi sababli yoriq kengligi hisoblari yuqori qiymat berishi mumkin. Basalt fibra qo'shish esa yoriqlar rivojlanishini cheklab, xizmat holatini yaxshilaydi. Shuningdek, basalt fibra betonning yoriqlanishdan keyingi ish qobiliyatini saqlab qolishi hisobiga elementning qattiqligi nisbatan yuqori bo'lib qoladi.

#### Xulosa

FRP armaturali temir-beton to'sinlar korroziyaga chidamlilik va yuqori tortilish mustahkamligi bo'yicha po'lat armaturaga nisbatan afzalliklarga ega.

FRP armaturaning elastiklik moduli pastligi sababli egilish deformatsiyasi va yoriq kengligi ortishi xizmat holati bo'yicha asosiy cheklov hisoblanadi.

Basalt fibra beton tarkibida mikroarmatura vazifasini bajarib, yoriqlar hosil bo'lishi va rivojlanishini cheklaydi hamda yoriq kengligini kamaytiradi.

Eurocode 2 bo'yicha yoriq kengligi hisoblash formulalari armatura deformatsiyasiga bog'liq bo'lib, FRP armatura qo'llanilganda yoriq kengligi yuqori chiqishi mumkin.

Basalt fibra qo'shish natijasida yoriqlar oralig'i va yoriq kengligi kamayib, FRP armaturali to'sinlarning ekspluatatsion ko'rsatkichlari yaxshilanadi.

FRP armatura va basalt fibra kombinatsiyasi agressiv muhitlarda ishlovchi temir-beton konstruksiyalar uchun istiqbolli va samarali yechim hisoblanadi.

#### **Foydalanilgan adabiyotlar (References)**

EN 1992-1-1: Eurocode 2: Design of Concrete Structures – Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings.

ACI 440.1R-15: Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with FRP Bars.

fib Model Code for Concrete Structures 2010.

CSA S806-12: Design and Construction of Building Components with Fibre-Reinforced Polymers.

Bank L.C. Composites for Construction: Structural Design with FRP Materials. Wiley, 2006.

Teng J.G., Chen J.F., Smith S.T., Lam L. FRP-Strengthened RC Structures. Wiley, 2002.

Nanni A., De Luca A. Reinforced Concrete with FRP Bars: Mechanics and Design. CRC Press.

Neville A.M. Properties of Concrete. Pearson Education.

Mehta P.K., Monteiro P.J.M. Concrete: Microstructure, Properties and Materials.

Sim J., Park C., Moon D.Y. Characteristics of basalt fiber as a strengthening material for concrete structures.

Dias D.P., Thaumaturgo C. Fracture toughness of basalt fiber reinforced concrete composites.

Branston J., Das S., Kenno S.Y., Taylor C. Mechanical behaviour of basalt fibre reinforced concrete.

Almusallam T.H. Load-deflection behavior of FRP reinforced concrete beams.

Benmokrane B., El-Salakawy E. Design of FRP reinforced concrete structures.

RILEM TC 162-TDF: Test and design methods for fibre reinforced concrete.

Li V.C. Engineered Cementitious Composites (ECC): Material, Structural, and Durability Performance.

Hassan T., Rizkalla S. Serviceability of FRP reinforced concrete beams.

El Refai A., Abed F., Altalmas A. Crack width prediction of FRP RC beams.

- Toutanji H., Saafi M. Durability of FRP reinforced concrete in harsh environments.
- Pacheco-Torgal F., Jalali S. Cementitious building materials reinforced with fibres.
- Kim J.K., Kim D.J. Flexural behavior of fiber reinforced concrete beams.
- Gao D., Zhang L. Crack control behavior of fiber reinforced concrete beams.
- Wang Y., Wu H.C., Li V.C. Concrete reinforcement with fibers.
- CEB-FIP Model Code 1990.
- ACI Committee 544. Report on Fiber Reinforced Concrete.
- ASTM C1609: Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber-Reinforced Concrete.
- Mindess S., Young J.F., Darwin D. Concrete. Prentice Hall.
- Barros J.A.O., Figueiras J.A. Crack width control in fiber reinforced concrete.
- Rakhshanimehr M., et al. Mechanical performance of basalt fiber reinforced concrete.
- Zollo R.F. Fiber-reinforced concrete: an overview.