



DOI: [10.71167/uaceg.2025.580314](https://doi.org/10.71167/uaceg.2025.580314)

Получена: 13.06.2025 г.

Приета: 27.06.2025 г.

## ИЗСЛЕДВАНЕ НА ЯКОСТНИТЕ И ДЕФОРМАЦИОННИТЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НА БЕТОН С РЕЦИКЛИРАНИ ПОЛИЕТИЛЕНТЕРАФТАЛАТНИ ГРАНУЛИ И ВЪЗМОЖНОСТИТЕ МУ ЗА ПРИЛОЖЕНИЕ В СТОМАНОБЕТОННИ КОНСТРУКТИВНИ ЕЛЕМЕНТИ

Б. Петров<sup>1</sup>, Р. Христов<sup>2</sup>

*Ключови думи:* бетон с рециклирани PET гранули, механични свойства, управление на отпадъците, устойчивост

### РЕЗЮМЕ

Качеството на бетона, разглеждано през призмата на неговата дълготрайност, физични и механични свойства, има ключово значение за строителния сектор. Наред с това, финансовите и екологичните разходи, свързани с неговото производство, предизвикват нарастващ интерес към устойчиви решения. Използването на отпадъци от полиетилентерефталат (PET), основно на рециклирани пластмасови бутилки под формата на гранули като заместител на пясъка в бетона, предлага редица предимства. То допринася за намаляване на количеството депонирани отпадъци и свързаното с тях замърсяване на околната среда, намалява зависимостта от естествени ресурси като пясък и чакъл и в определени случаи подобрява механичните свойства на крайния продукт. Настоящото изследване разглежда свойствата на бетон с добавка на рециклирани PET гранули, използвани като частичен заместител на пясъка, както и влиянието на водоциментовото съотношение. Чрез двуфакторен планиран експеримент са оценени ключови характеристики като плътност, якост на натиск, модул на еластичност, якост на опън при разцепване и якост на огъване.

---

<sup>1</sup> Богомил Петров, проф. д-р инж., кат. „Строителни материали и изолации“, УАСГ, бул. „Хр. Смирненски“ № 1, 1046 София, e-mail: [b\\_petrov@abv.bg](mailto:b_petrov@abv.bg)

<sup>2</sup> Рази Христов, инж., кат. „Строителни материали и изолации“, УАСГ, бул. „Хр. Смирненски“ № 1, 1046 София, e-mail: [rhristov\\_fce@uacg.bg](mailto:rhristov_fce@uacg.bg)

## 1. Въведение

- Актуалност на темата

Глобалният ръст в производството и потреблението на пластмаси, в частност полиетилентерефталат (PET), води до сериозно екологично предизвикателство, свързано с тяхното депониране и трудното им разграждане в природата. Според данни на международни организации, годишното производство на пластмаса надхвърля 360 милиона тона, като PET бутилките представляват съществен дял от този обем. Нарастващите изисквания за устойчиво развитие и опазване на природните ресурси налагат търсене на алтернативни решения за повторна употреба и рециклиране на отпадъците.

Строителният сектор, като един от най-големите потребители на суровини, има потенциала да интегрира рециклирани материали в производството на строителни изделия и конструкции. Използването на рециклирани PET гранули като частичен заместител на пясъка в бетона представлява иновативен подход, който може да допринесе както за намаляване на екологичния отпечатък, така и за оптимизация на механичните характеристики на бетонните смеси. Настоящото изследване се вписва в глобалните усилия за устойчиво строителство, като разглежда възможностите за приложение на бетон с рециклирани PET гранули в стоманобетонни конструктивни елементи с оглед на тяхната якост, деформационни характеристики и дълготрайност.

- Глобален проблем с отпадъците от пластмаса

Пластмасовите отпадъци са един от най-значимите екологични проблеми в световен мащаб. Около 8 до 12 % от общия обем на твърдите битови отпадъци в различните страни се състои от пластмаса, като този процент продължава да нараства в резултат на индустриализацията, урбанизацията и промените в потребителските навици. По данни на PlasticsEurope, глобалното производство на пластмаса е достигнало 360 милиона тона през 2020 г., като полиетилентерефталатът (PET) представлява съществена част от този обем, най-вече под формата на опаковъчни материали и бутилки за напитки. Значителното натрупване на отпадъци от PET в депа и водни басейни води до сериозни екологични и здравословни рискове. Пластмасата се разгражда изключително бавно, като разпадът ѝ може да отнеме стотици години, отделяйки микропластмаси, които навлизат в хранителната верига.

Въпреки наличието на технологични решения за рециклиране, нивото на ефективна преработка на PET остава ниско – например в САЩ през 2017 г. са рециклирани едва 31 % от общия обем на PET отпадъците. Същевременно, прогнозите показват, че глобалното потребление на PET бутилки ще достигне 513 милиарда литра до 2025 г., което ще доведе до още по-сериозно натоварване върху околната среда, ако не бъдат предприети адекватни мерки за повторната му употреба. В този контекст, намирането на иновативни начини за рециклиране на PET отпадъците, включително тяхното приложение в строителството, придобива все по-голяма значимост като част от концепцията за кръгова икономика и устойчиво развитие.

- Предишни изследвания върху добавки от PET в бетон

През последните две десетилетия редица изследователи разглеждат възможностите за използване на отпадъчен полиетилентерефталат (PET) като частичен заместител или добавка в бетонните смеси. Основните изследователски подходи се фокусират върху включване на PET във вид на влакна, фибри, гранули или прах. Според

Saikia и Brito (2014) [1], включването на PET влакна в бетона подобрява неговата устойчивост на напукване и ударна якост, като в същото време намалява плътността му, което е особено полезно за леки конструкции. Други изследвания (Frigione, 2010; Ochi et al., 2007 [2, 3]) показват, че влакнестият PET може да увеличи енергията на разрушаване и да повиши пластичността на бетона.

Изследванията на Al-Manaseer и Dalal (1997) [4] установяват, че използването на натрошен PET като заместител на пясъка води до намаляване на якостта на натиск, но същевременно намалява и обемното тегло, което го прави подходящ за определени видове конструктивни елементи.

В последните години се обръща внимание и на използването на PET гранули, получени чрез механично гранулиране, което позволява по-лесна интеграция в бетонните смеси и по-добра однородност (Pacheco-Torgal et al., 2012) [5]. Общата тенденция в литературата показва, че при оптимално съдържание (обикновено около 10 % заместване на пясъка) PET може да подобри някои механични и деформационни характеристики на бетона, като същевременно допринася за намаляване на екологичния отпечатък.

Тези резултати служат като основа за настоящото изследване, което цели да установи влиянието на различни количества PET гранули върху якостните и деформационните свойства на бетон, предназначен за приложение в стоманобетонни конструктивни елементи.

- Цел и задачи на изследването

Основна цел:

**Изследване на якостните и деформационни характеристики на бетон, съдържащ рециклирани PET гранули, с цел да се определи неговата приложимост в стоманобетонни конструктивни елементи.**

Специфични цели и задачи:

- Да се изследва влиянието на състава и относителния дял на рециклирани PET гранули върху консистенцията, плътността и въздухосъдържанието на бетонната смес.
- Да се установи влиянието на относителния дял на рециклирани PET гранули върху якостта на натиск, якостта на опън при огъване и якостта на опън при разцепване на втвърдения бетон.
- Да се установи влиянието на относителния дял на PET гранули върху изменението на деформационните свойства и модула на еластичността на втвърдения бетон.
- Да се оцени влиянието на рециклираните PET гранули върху дълготрайността на бетона чрез изследване на електропотенциала на носещата армировка в бетона.
- Да се оцени влиянието на рециклираните PET гранули върху мразоустойчивостта на бетона.
- Да се изследва влиянието на факторите на състава и относителния дял на рециклирани PET гранули върху сцеплението на армировката с бетона.
- Да се изследват възможностите за оптимизиране на състава на бетона чрез промяна на процентното съдържание на PET гранулите и водоциментовото отношение.

- Да се разработят предложения за практическо приложение на бетони с рециклирани РЕТ гранули, като се изследва поведението на стоманобетонни елементи с цел икономически ефективно и екологично използване на материалите.

Това изследване има за цел да допринесе за намаляване на отпадъците от РЕТ, подобряване на устойчивостта на строителните материали и подпомагане на кръговата икономика в строителния сектор.

- Хипотеза: заместването на пясъка с РЕТ гранули в определени граници подобрява механичните свойства на бетона.

Настоящото изследване се основава на хипотезата, че включването на рециклирани полиетилентерефталатни (РЕТ) гранули като частичен заместител на пясъка в бетонната смес може да доведе до подобряване на някои от основните механични и деформационни характеристики на бетона. По-конкретно се очаква, че:

- добавянето на РЕТ гранули в оптимално количество (10 % – 20 % обемно заместване на пясъка) ще подобри пластичността и устойчивостта на пукнатини в бетонните елементи;
- обемната плътност ще намалява с увеличаването на процентното съотношение гранули в бетона;
- модулът на еластичност ще намалява с увеличаването на процентното съотношение гранули в бетона;
- при високо съдържание на РЕТ (над 15 %) се предполага, че може да настъпи влошаване на якостта на натиск и микроструктурната хомогенност на бетона.

Чрез систематично експериментално изследване върху бетонни проби с различно съдържание на РЕТ гранули се цели верифициране или опровержение на тези предположения и определяне на оптималното съдържание за практически приложения в стоманобетонни конструктивни елементи.

## **2. Материали и методи**

### **2.1. Материали**

В настоящото изследване са използвани следните основни материали за изготвяне на бетонните смеси:

#### **Цимент**

Портланд цимент СЕМ I 52.5 N, отговарящ на изискванията на БДС EN 197-1. Циментът е с нормална начална якост и добра работоспособност.

#### **Едър добавъчен материал**

Трошен камък с размери от 4 до 11,2 mm, с плътност около 2780 kg/m<sup>3</sup>. Извършено е пресяване и измиване за отстраняване на прахови частици.

#### **Дребен добавъчен материал**

Речен пясък с максимален размер на зърното 4 mm, с плътност около 2565 kg/m<sup>3</sup>.

## Вода

Чиста питейна вода, отговаряща на изискванията на БДС EN 1008 за приготвяне на бетон.

## Рециклирани РЕТ гранули

Отпадъчни полиетилентерефталатни (РЕТ) бутилки, механично гранулирани до размери 1 – 4 mm.

Гранулите са използвани като частичен заместител на пясъка в бетонната смес в следните процентни съотношения спрямо обема на пясъка: 0 % (контролна смес), 10 %, 15 % и 20 %.

Плътност на РЕТ гранулите: приблизително 1350 kg/m<sup>3</sup>.

## Добавки

Пластифицираща добавка за контролиране на слягането.

Таблица 1. Плътност на използваните материали

Материал	Обемна плътност в насипно състояние (kg/m <sup>3</sup> )	Специфична плътност (kg/m <sup>3</sup> )
Цимент (СЕМ I 52,5)	1029,8	3000,0
Пясък (среден)	1321,0	2564,1
Трошен камък (4/11,2)	1488,3	2778,0
РЕТ гранули	839,2	1388,8

## 2.2. Подготовка на пробите

Таблица 2. План на експеримента

Изпитване	Процентно съотношение РЕТ гранули		Водоциментно отношение W/C	
SCC1	-1	10 %	-1	0,4
SCC2	-1	10 %	0	0,475
SCC3	-1	10 %	1	0,55
SCC4	0	15 %	-1	0,4
SCC5	0	15 %	0	0,475
SCC6	0	15 %	1	0,55
SCC7	1	20 %	-1	0,4
SCC8	1	20 %	0	0,475
SCC9	1	20 %	1	0,55
SCC10	I	0 %	I	0,4
SCC11	II	0 %	II	0,475
SCC12	III	0 %	III	0,55

Бетонните смеси са изготвени в лабораторни условия в съответствие с изискванията на БДС EN 206. В настоящото изследване не е зададена целева класова якост, като основната цел беше да се изследва влиянието на различни водоциментни

отношения и съдържание на рециклирани PET гранули върху якостните и деформационните характеристики на бетона.

Използвани са три различни водоциментни отношения (W/C):

- **0,400**
- **0,475**
- **0,550**

За всяко водоциментно отношение са изготвени бетонни смеси с три нива на съдържание на рециклирани PET гранули като частичен заместител на пясъка:

- 10 %
- 15 %
- 20 % (в обем спрямо пясъка)

**Таблица 3. Рецептурни състави**

№ на състава	В/Ц	Маса на материалите за 1 m <sup>3</sup> бетонова смес					Съотношение PET гранули в състава %
		Вода, l	Цимент, kg	ЕДМ, kg	Пясък, kg	PET гранули, kg	
SCC1	0,400	200	500,0	1109,5	493,7	29,7	10
SCC2	0,475	200	421,1	1157,0	514,9	31,0	10
SCC3	0,550	200	363,6	1191,7	530,4	31,9	10
SCC4	0,400	200	500,0	1109,5	466,3	44,6	15
SCC5	0,475	200	421,1	1157,0	486,3	46,5	15
SCC6	0,550	200	363,6	1191,7	500,9	47,9	15
SCC7	0,400	200	500,0	1109,5	438,9	59,4	20
SCC8	0,475	200	421,1	1157,0	457,7	62,0	20
SCC9	0,550	200	363,6	1191,7	471,4	63,8	20
SCC10	0,400	200	500,0	1109,5	548,6	0	0
SCC11	0,475	200	421,1	1157,0	572,1	0	0
SCC12	0,550	200	363,6	1191,7	589,3	0	0

**Процедурата на приготвяне включва:**

1. **Сухо смесване** на цимента, трошения камък и пясъка (включително PET гранулите) в продължение на **2 – 3 минути**.
2. **Постепенно добавяне на вода**, съобразена с водоциментното отношение, и продължаване на смесването до получаване на хомогенна смес (**приблизително 5 минути**).
3. **Изработване на пробни тела** за изпитванията:
  - **Кубични проби** (100/100/100 mm) за определяне на якостта на натиск и обемната плътност.
  - **Цилиндрични проби** (Ø150 mm, височина 300 mm) за определяне на модул на еластичност.
  - **Цилиндрични проби** (Ø150 mm, височина 150 mm) за определяне на якост на опън при разцепване.
  - **Призматични греди** (100 mm × 100 mm × 400 mm) за изпитвания на опън при огъване.

4. Вибриране на сместа на вибромаса с цел минимизиране на въздушните кухини.
5. **Съхранение на пробите** в калпи при температура  $20 \pm 2$  °C и относителна влажност  $\geq 95$  % за период от **24 часа**.
6. След разкалпване пробите се съхраняваха във водна баня при  $20 \pm 2$  °C до изпитванията, провеждани на **28 и 90 дни**.

### **2.3. Методи на изпитване**

За оценка на влиянието на съдържанието на PET гранули и водоцементното отношение върху физико-механичните свойства на бетона са проведени следните лабораторни изпитвания:

#### **Обемна плътност**

Измерена е на втвърден бетон чрез хидростатична везна, в съответствие с изискванията на БДС EN 12390-7.

#### **Консистенция**

Определена е на пресния бетон съгласно БДС EN 12350-2, чрез метода на конуса на Абрамс. Консистенцията на всички замеси е коригирана чрез пластификатор, така че слягането да е между 10 – 15 cm (S3).

#### **Якост на натиск**

Определена е върху кубични пробни тела с размери 100×100×100 mm на 28-ия ден, в съответствие с изискванията на БДС EN 12390-3.

#### **Модул на еластичност**

Изпитването е проведено върху цилиндрични образци (Ø150 mm, височина 300 mm) по БДС EN 12390-13, чрез приложение на осови натоварвания с измерване на деформациите.

#### **Якост на опън при разцепване**

Изпитана е съгласно БДС EN 12390-6 върху цилиндричните проби.

#### **Якост на опън при огъване**

Проведено е върху призматични греди (100 mm × 100 mm × 400 mm) съгласно БДС EN 12390-5.

#### **Измерване на скоростта на ултразвукови вълни**

Извършено е неразрушително изпитване за оценка на хомогенността и наличието на вътрешни дефекти в структурата на бетона с ултразвуков дефектоскоп, съгласно БДС EN 12504-4.

## **3. Резултати**

В тази част са представени резултатите от лабораторните изпитвания на бетонните проби с различно водоцементно отношение и съдържание на рециклирани PET гранули.

**Таблица 4. Резултати за водоциментно отношение W/C = 0,4**

Съдържание на РЕТ (%)	Обемна плътност (kg/m <sup>3</sup> )	Скорост на ултразвукови вълни (m/s)	Якост на натиск (MPa)	Модул на еластичност (MPa)	Якост на опън при разцепване (MPa)	Якост на опън при огъване (MPa)
0,0	2459,52	4928,46	74,54	39824,72	4,54	7,21
10,0	2450,0	4970,15	74,21	38221,18	4,52	6,97
15,0	2410,0	4736,24	71,70	38270,82	4,28	6,20
20,0	2360,0	4604,97	64,33	33701,41	3,90	5,74

**Таблица 5. Резултати за водоциментно отношение W/C = 0,475**

Съдържание на РЕТ (%)	Обемна плътност (kg/m <sup>3</sup> )	Скорост на ултразвукови вълни (m/s)	Якост на натиск (MPa)	Модул на еластичност (MPa)	Якост на опън при разцепване (MPa)	Якост на опън при огъване (MPa)
0,0	2432,81	4835,89	60,96	37849,94	4,70	5,69
10,0	2390,00	4612,40	58,79	33883,50	4,05	6,24
15,0	2380,00	4459,51	58,88	35001,86	3,96	5,74
20,0	2350,00	4409,26	54,11	31501,18	3,72	5,55

**Таблица 6. Резултати за водоциментно отношение W/C = 0,55**

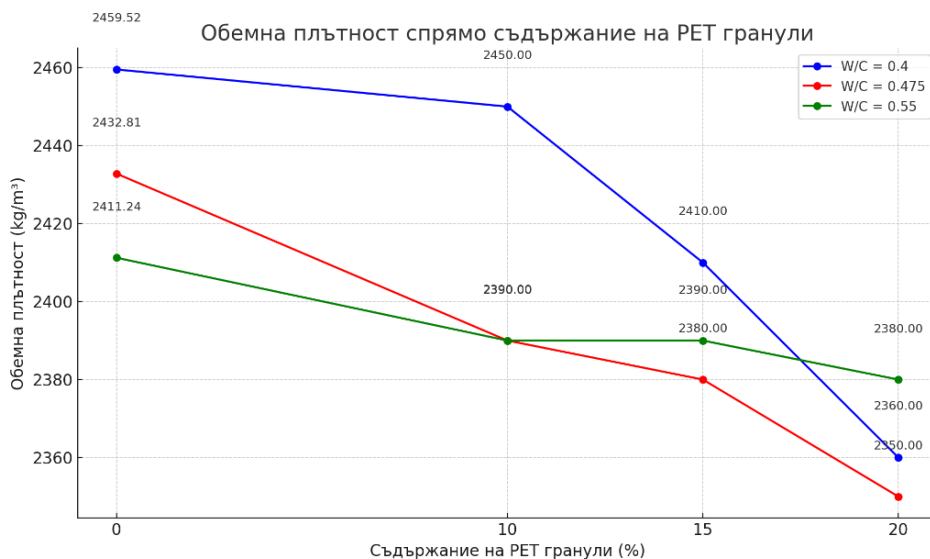
Съдържание на РЕТ (%)	Обемна плътност (kg/m <sup>3</sup> )	Скорост на ултразвукови вълни (m/s)	Якост на натиск (MPa)	Модул на еластичност (MPa)	Якост на опън при разцепване (MPa)	Якост на опън при огъване (MPa)
0,0	2411,24	4715,60	55,51	36934,21	3,88	5,13
10,0	2390,00	4653,54	49,23	32737,57	3,69	4,94
15,0	2390,00	4581,66	51,92	34924,66	3,74	4,71
20,0	2380,00	4612,42	49,75	32492,70	3,65	4,80

### 3.1. Консистенция

С увеличаването на съдържанието на РЕТ гранули се наблюдава намаляване на консистенцията на бетонната смес. При по-високи проценти на заместване (15 % и 20 %) се отчита по-ниско слягане, което е резултат от по-ниската водоабсорбция и различната повърхностна текстура на РЕТ гранулите спрямо естествения пясък. При водоциментно отношение 0,40 ефектът е по-силно изразен, поради по-малкото количество свободна вода в сместа. За да постигнем еднакви условия на уплътняване на бетоновата смес, контролирахме слягането чрез пластифицираща добавка, така че то да е със стойности между 10 – 15 cm (S3).

### 3.2. Обемна плътност

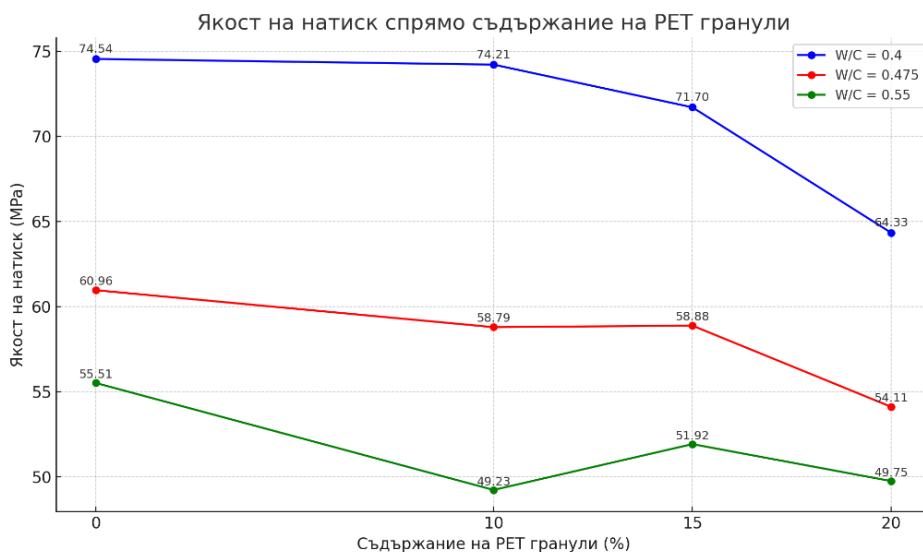
Добавянето на РЕТ гранули води до понижаване на обемната плътност на бетона. Намалението е най-значително при 20 % съдържание на РЕТ, където плътността намалява с около 4 % – 5 % спрямо контролните проби. Това се обяснява с по-ниската обемна плътност на РЕТ гранулите в сравнение с пясъка. При водоциментно отношение 0,40 бетоновите смеси запазват най-висока плътност за всички нива на РЕТ съдържание.



Фиг. 1. Обемна плътност спрямо съдържанието на PET и W/C отношение

### 3.3. Якост на натиск

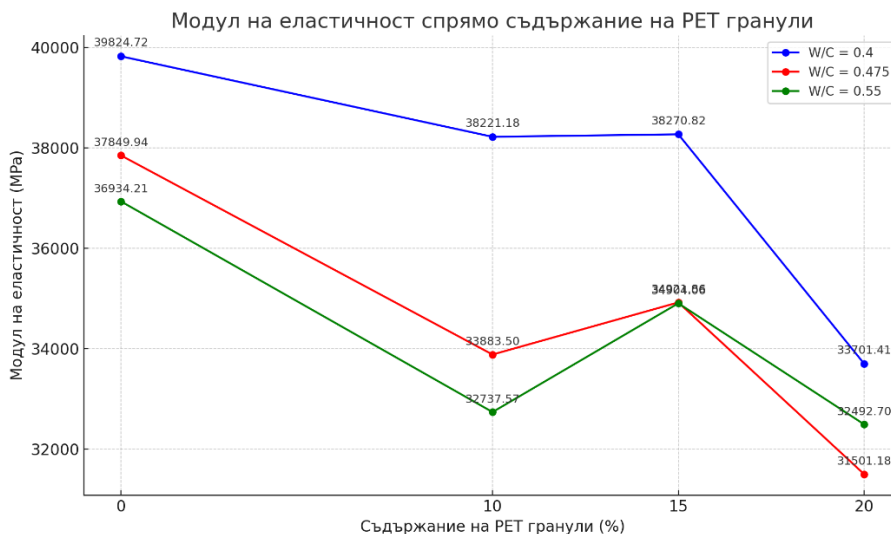
Резултатите показват ясно понижаване на якостта на натиск с увеличаване на съдържанието на PET гранули за всички водоциментни съотношения. Най-висока якост е отчетена при пробите с 10 % PET и водоциментно отношение 0,40, където ефектът от добавените гранули е минимално негативен. При по-високи съдържания на PET (15 % и 20 %) и особено при водоциментно отношение 0,55 се наблюдава значително влошаване на якостта, свързано с повишена порьозност и намалена хомогенност на структурата.



Фиг. 2. Якост на натиск спрямо съдържанието на PET и W/C отношение

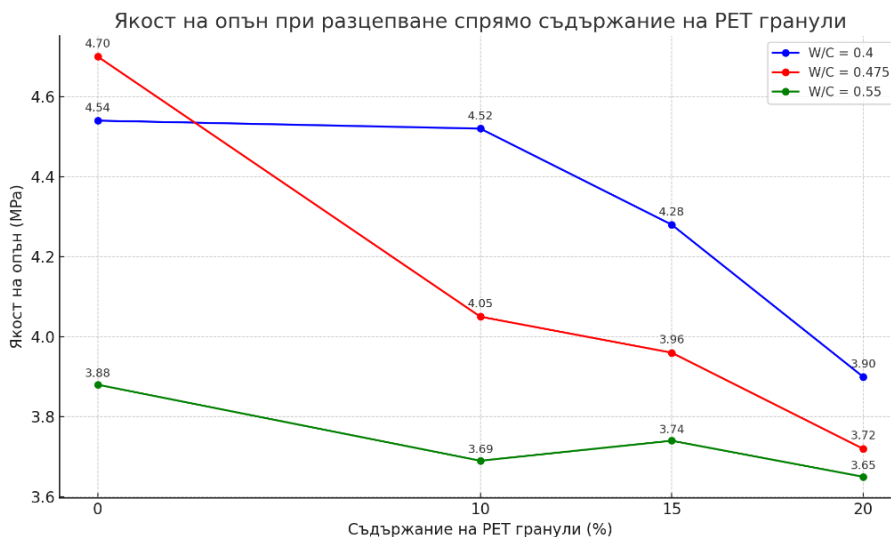
### 3.4. Модул на еластичност

Модулът на еластичност следва тенденция, аналогична на якостта на натиск. Оптимални стойности са отчетени при 10 % PET, особено при водоциментно отношение 0,40, докато при 15 % и 20 % PET и високи W/C отношения се наблюдава значително намаляване на еластичността. Това показва, че високото съдържание на PET намалява способността на бетона да устоява на деформации под натоварване.



Фиг. 3. Модул на еластичност спрямо съдържанието на PET и W/C отношение

### 3.5. Якост на опън при разцепване

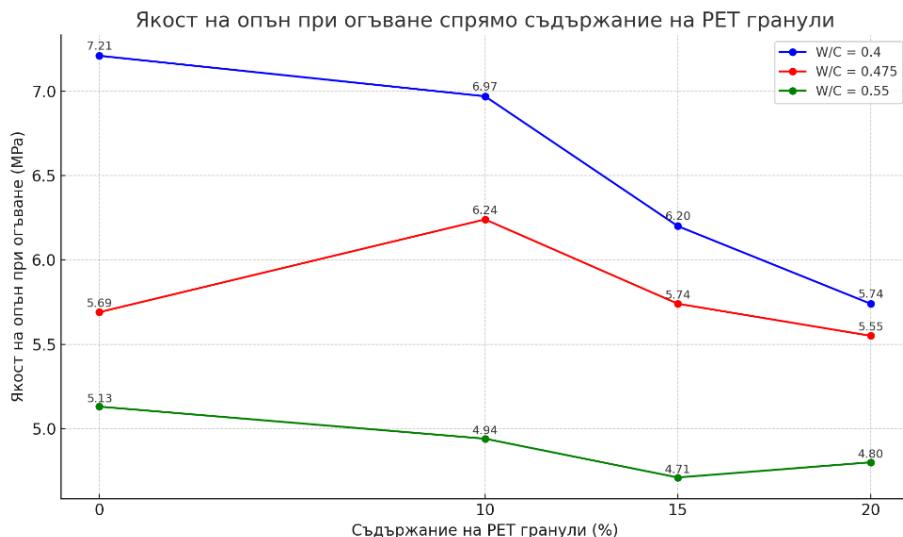


Фиг. 4. Якост на опън при разцепване спрямо съдържанието на PET и W/C отношение

Влиянието на PET гранулите върху якостта на опън при разцепване е по-слабо изразено в сравнение с натиск. При 10 % PET се наблюдава запазване на якостта, особено при водоциментно отношение 0,40. При по-високи съдържания на PET (15 % и 20 %) якостта намалява, като спадът е най-изразен при най-високото водоциментно отношение (0,55).

### 3.6. Якост на опън при огъване

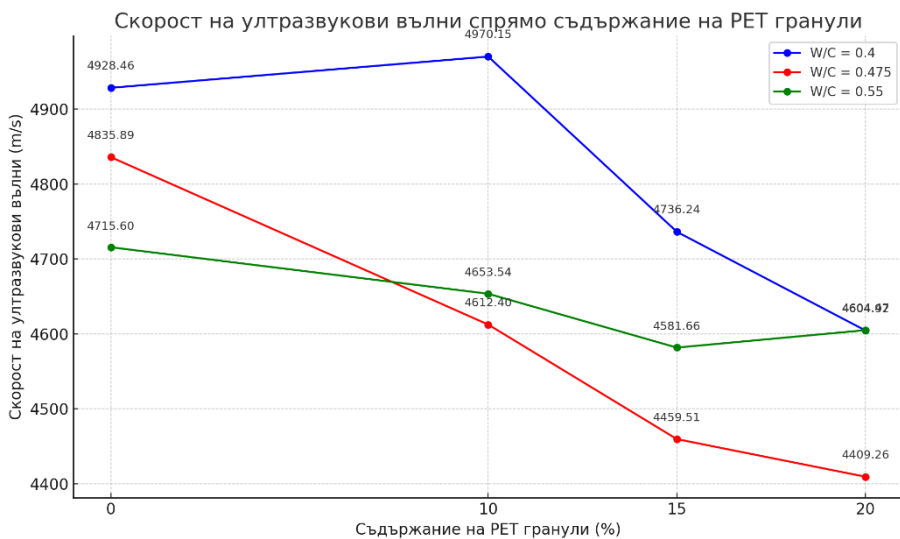
Резултатите за якостта на опън при огъване показват плавна тенденция на понижаване с увеличаване на PET съдържанието. Най-добри резултати са отчетени при 10 % PET за всички водоциментни съотношения, като пробите с  $W/C = 0,40$  показват минимален спад спрямо контролните образци. При 15 % и 20 % PET се наблюдава отчетливо намаление на огъвната якост, особено при по-високи водоциментни съотношения, което ограничава използването на такива смеси в конструктивно натоварени елементи.



Фиг. 5. Якост на опън при огъване спрямо съдържанието на PET и W/C отношение

### 3.7. Измерване на скоростта на ултразвуковите вълни

Скоростта на разпространение на ултразвукови вълни в бетонните проби намалява с увеличаването на съдържанието на PET гранули. Най-високи скорости са отчетени при контролния състав и при смеси с 10 % PET и ниско водоциментно отношение (0,40). Намалението на скоростта при по-високо съдържание на PET се дължи на повишената порьозност и вероятното наличие на микродефекти в структурата на бетона.



Фиг. 6. Скорост на ултразвукови вълни спрямо съдържанието на PET и W/C отношение

#### 4. Обсъждане

Настоящото изследване показва, че включването на рециклирани PET гранули като частичен заместител на пясъка в бетонните смеси оказва комплексно влияние върху физико-механичните характеристики на бетона.

Добавянето на PET води до по-ниска обемна плътност, което е резултат от по-ниската плътност на полимерния материал спрямо естествения пясък. Това намаление може да бъде разглеждано като предимство за приложения, при които се изисква намалено собствено тегло на конструкциите.

Що се отнася до механичните характеристики, най-добри резултати бяха отчетени при съдържание на PET гранули от 10 %. При това ниво на заместване якостта на натиск, якостта на опън и огъване, както и модулът на еластичност запазиха сравнително високи стойности, близки до контролните проби, като дори в някои случаи се наблюдаваше леко подобрение на якостта на опън при разцепване.

С повишаване на съдържанието на PET до 15 % и 20 % се наблюдава ясно влошаване на всички якостни показатели, особено при по-високи водоцементни съотношения. Това се дължи на по-високата порьозност, по-лошото сцепление между PET гранулите и циментовата матрица, както и на потенциалното образуване на микропукнатини.

Скоростта на ултразвуковите вълни също потвърди тези тенденции, като при пробите с най-високо съдържание на PET се отчете най-ниска стойност, което е индикатор за намалена хомогенност и повишена порьозност на материала.

Обобщено, резултатите показват, че оптималното съдържание на рециклирани PET гранули е около 10 %, при което се постига баланс между екологичните ползи и минимално влошаване на механичните свойства. По-високите съдържания на PET не се препоръчват за носещи елементи, но могат да бъдат разглеждани за неносещи конструкции, изолационни слоеве или декоративни елементи.

## 4.1. Сравнение с резултати от други изследвания

Резултатите от настоящото изследване съответстват в значителна степен на публикуваните данни в научната литература. Saikia и Brito (2014) [1] докладват, че добавянето на PET частици до 10 % в бетонните смеси води до минимално влошаване на якостта на натиск и дори до подобрене на устойчивостта към образуване на пукнатини. Подобна тенденция се наблюдава и в настоящото изследване, където пробите с 10 % PET показват оптимален баланс между якостни характеристики и намаляване на плътността.

Frigione (2010) и Ochi et al. (2007) [2, 3] също установяват, че използването на PET влакна или гранули в количества над 15 % води до значително понижаване на якостта на натиск и модула на еластичност, което напълно съвпада с отчетените в настоящото изследване резултати.

В изследванията на Al-Manaseer и Dalal (1997) [4] се посочва, че използването на натрошен PET като заместител на пясъка води до намаляване на якостта, но същевременно и до намаляване на собственото тегло на бетона – ефект, който се потвърди и в настоящата работа.

Съществен принос към потвърждаването на резултатите има и изследването на Eyni Kangavar et al. (2024) [6], в което се установява, че при заместване до 10 % от пясъка с PET гранули, бетонът запазва добра якост и модул на еластичност, като същевременно намалява плътността и подобрява устойчивостта към образуване на пукнатини. При по-големи количества PET се наблюдава рязък спад в механичните свойства, което напълно съвпада с резултатите от настоящото изследване.

По отношение на скоростта на ултразвуковите вълни, наблюдаваното намаление с увеличаване на PET съдържанието съвпада с данните, представени от Pacheco-Torgal et al. (2012) [5], които докладват за влошаване на хомогенността и повишаване на вътрешната порьозност при високи съдържания на PET.

В обобщение, резултатите от това изследване потвърждават вече установените в научната литература тенденции, като добавят допълнителни експериментални данни, потвърждаващи оптималното съдържание на PET гранули в диапазона до 10 % за постигане на балансирани характеристики на бетона.

## 4.2. Влияние на различните проценти PET върху механичните характеристики

Резултатите от проведените експериментални изследвания показват ясно влияние на съдържанието на рециклирани PET гранули върху основните механични характеристики на бетона.

При съдържание на PET гранули до 10 %, бетонните смеси запазват много добри якостни показатели. Якостта на натиск, якостта на опън при разцепване и при огъване, както и модулът на еластичност се намират в границите на минимално допустимо отклонение спрямо контролните образци без PET. При определени условия дори се регистрира леко подобрене в якостта на опън, което може да се дължи на подобреното разпределение на напреженията около вградените гранули.

С увеличаване на съдържанието на PET до 15 % се отчита постепенно намаляване на всички механични характеристики. Най-ясно изразено е влошаването на якостта на натиск и на модула на еластичност, което се дължи на нарастването на порьозността и по-слабата връзка между PET гранулите и циментовата матрица.

При 20 % PET се наблюдава значително понижение във всички измерени механични свойства. Особено чувствително е намалението на якостта на натиск и на скоростта на ултразвуковите вълни, което е показател за повишена вътрешна порьозност и влошена структура на материала. Якостта на опън и огъване също показват сериозно влошаване, което ограничава приложението на такива смеси в носещи стоманобетонни конструкции.

В обобщение, експерименталните резултати потвърждават, че 10 % съдържание на PET гранули представлява оптималния компромис между екологични предимства и запазване на добри механични свойства, докато по-високи съдържания водят до значително влошаване на характеристиките на материала.

### **4.3. Предимства и ограничения при използване на PET в бетон**

Използването на рециклирани полиетилентерефталатни (PET) гранули като частичен заместител на пясъка в бетонните смеси предлага редица предимства, които могат да допринесат за устойчиво и екологично строителство:

Намаляване на количеството отпадъци: PET отпадъците се оползотворяват ефективно, като се намалява натоварването върху депата за отпадъци и се ограничава замърсяването на околната среда.

Намаляване на теглото на бетона: Поради по-ниската плътност на PET спрямо пясъка се постига редуция на обемното тегло на бетонните елементи, което може да бъде предимство при неносещи конструкции или елементи с необходимост от намалено собствено тегло.

Икономически ползи: Частичното заместване на природни ресурси с рециклиран материал може да доведе до намаляване на разходите за суровини.

Добра устойчивост на образуване на пукнатини: При съдържание до 10 % PET се наблюдава положителен ефект върху устойчивостта на бетона към напукване.

Въпреки тези предимства, съществуват и съществени ограничения, които следва да се вземат предвид при проектирането и приложението на бетон с PET гранули:

Намаление на механичните свойства: При съдържание на PET над 10 % се установява значително понижение на якостта на натиск, модула на еластичност и якостта на опън, което ограничава използването в носещи конструктивни елементи.

Влошена работоспособност: Наблюдава се намаление на обработваемостта с увеличаване на PET съдържанието, което може да наложи използването на допълнителни пластифициращи добавки.

По-голяма порьозност: Повишената вътрешна порьозност при високи съдържания на PET води до влошаване на хомогенността и дълготрайността на бетона.

В заключение, използването на PET в бетон е перспективно и екологично устойчиво решение при стриктен контрол на съдържанието, като оптималният резултат се постига до 10 % PET гранули.

## **5. Заключение**

Настоящото изследване оценява влиянието на рециклирани полиетилентерефталатни (PET) гранули върху якостните и деформационните характеристики на бетон, като са разгледани различни водоциментни съотношения и съдържания на PET.

Получените резултати показват, че добавянето на PET гранули като частичен заместител на пясъка води до намаляване на плътността на бетона, което може да бъде предимство за редица неносещи конструкции.

Оптималните характеристики се постигат при съдържание на PET до 10 %, където бетонът запазва добри якостни показатели, минимално намаление на якостта на натиск, подобрена устойчивост към образуване на пукнатини.

При съдържание на PET над 15 % се установява ясно влошаване на всички механични характеристики, свързано с повишена порьозност и по-слаба връзка между гранулите и циментовата матрица, което ограничава приложението му в носещи конструкции.

В заключение, изследването доказва, че включването на рециклирани PET гранули в бетон представлява устойчиво и екологично решение, с потенциал за практическо приложение при строго контролирано съдържание. Това отваря възможности за намаляване на отпадъците от пластмаса и икономия на природни ресурси в строителството.

Препоръчва се провеждането на допълнителни изследвания върху поведението на бетон с PET при дългосрочни натоварвания, циклично натоварване и реални конструктивни условия.

## Благодарности

Настоящата научноизследователска разработка по договор Д-161/2024 е подкрепена финансово от Центъра за научни изследвания и проектиране при УАСГ.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Saikia, N., Brito, J.* Recycled plastic waste as aggregate replacement in concrete: A review. *Waste Management*, 2014, 50, 711 – 729.
2. *Frigione, M.* Recycling of PET bottles as fine aggregate in concrete. *Construction and Building Materials*, 2010, 30(6), 1101 – 1106.
3. *Ochi, T., Okubo, S., Fukui, K.* Development of recycled PET fiber and its application as concrete-reinforcing fiber. *Cement and Concrete Composites*, 2007, 29(6), 448 – 455.
4. *Al-Manaseer, A. A., Dalal, T. R.* Concrete containing plastic aggregates. *Concrete International*, 1997, 19(8), 47 – 52.
5. *Pacheco-Torgal, F., Jalali, S.* Reusing plastic waste in concrete: Challenges and opportunities. *Construction and Building Materials*, 2012, 2012, 30, 714 – 724.
6. *Eyni Kangavar, M., Lokuge, W., Manalo, A., Karunasena, W., Frigione, M.* Investigation on the properties of concrete with recycled polyethylene terephthalate (PET) granules as fine aggregate replacement. *Engineering Structures*, 2024, 298, 117481.

# INVESTIGATION OF THE STRENGTH AND DEFORMATION CHARACTERISTICS OF CONCRETE WITH RECYCLED POLYETHYLENE TEREPHTHALATE (PET) GRANULES AND ITS POTENTIAL APPLICATION IN REINFORCED CONCRETE STRUCTURAL ELEMENTS

**B. Petrov<sup>1</sup>, R. Hristov<sup>2</sup>**

*Keywords: recycled PET aggregate concrete, mechanical properties, waste management, sustainability*

## ABSTRACT

The quality of concrete, viewed through the prism of its durability, physical and mechanical properties, is of key importance to the construction sector. At the same time, the financial and environmental costs associated with its production have sparked increasing interest in sustainable solutions. The use of waste polyethylene terephthalate (PET), primarily from recycled plastic bottles in the form of granules as a replacement for fine aggregate in concrete, offers a number of advantages. It contributes to the reduction of landfill waste and associated environmental pollution, decreases dependence on natural resources such as sand and gravel, and in certain cases, enhances the mechanical properties of the final product.

This study investigates the properties of concrete incorporating recycled PET granules as a partial replacement for fine aggregate, as well as the influence of the water-to-cement (w/c) ratio. Through a two-factor experimental design, key characteristics such as density, compressive strength, elastic modulus, splitting tensile strength, and flexural strength are evaluated.

---

<sup>1</sup> Bogomil Petrov, Prof. Dr. Eng., Dept. "Building Materials and Insulations", UACEG, 1 H. Smirnenki Blvd., Sofia 1046, e-mail: [b\\_petrov@abv.bg](mailto:b_petrov@abv.bg)

<sup>2</sup> Razi Hristov, Eng., Dept. "Building Materials and Insulations", UACEG, 1 H. Smirnenki Blvd., Sofia 1046, e-mail: [rhrstov\\_fce@uacg.bg](mailto:rhrstov_fce@uacg.bg)