

UDC 625.21

SCOPUS CODE 2205

<https://doi.org/10.36073/1512-0996-2026-3-161-169>

პოლიეთილენტერეფტალატით საგზაო ბიტუმის მოდიფიკაციის თავისებურებები

თენგიზ პაპუაშვილი	საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის სამშენებლო ფაკულტეტის პროფესორი E-mail: papuashvilitengizi01@gtu.ge
ალექსი ბურდულაძე	საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის სამშენებლო ფაკულტეტის პროფესორი E-mail: a.burduladze@gtu.ge
ნუგზარ რურუა	საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის სამშენებლო ფაკულტეტის პროფესორი E-mail: n.rurua@gtu.ge
გიორგი აღნიაშვილი	საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის სამშენებლო ფაკულტეტის დოქტორანტი E-mail: agniashviligiorgi92@gmail.com
თორნიკე ფოჩხიძე	საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის სამშენებლო ფაკულტეტის მაგისტრანტი E-mail: pochkhidzepp@icloud.com

რეცენზენტები:

პ. ნადირაშვილი, საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის სამშენებლო ფაკულტეტის პროფესორი
E-mail: p.nadirashvili@gtu.ge

კ. მჭედლიშვილი, საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის სამშენებლო ფაკულტეტის პროფესორი
E-mail: mtchedlishvilikonstantine01@gtu.ge

ანოტაცია. ბოლო წლებში დაგროვდა მნიშვნელოვანი ცოდნა, როგორც სამეცნიერო კვლევის, ისე მოდიფიცირებული ბიტუმების გამოყენების პრაქტიკული გამოცდილების საფუძველზე, ეფექტური და იაფი მოდიფიკატორები ყველაზე დიდ ინტე-

რეს იწვევს. თუმცა, ასფალტბეტონის ნარევებში მოდიფიცირებული ბიტუმების გამოყენების გამოცდილება აჩვენებს, რომ მზა მასალის საჭირო თვისებების მიღწევა ყოველთვის არ არის შესაძლებელი. სტატიაში წარმოდგენილია კვლევის შედეგები, რომლებიც დაკავშირებულია საგზაო ბიტუმის თვისე-

ბების გაუმჯობესებასთან მისი პოლიეთილენტერეფტალატით მოდიფიცირებით. განისაზღვრა ბიტუმის მოდიფიკაციისთვის პოლიეთილენტერეფტალატის ოპტიმალური შემცველობა, რაც ხელს უწყობს დასრულებული მასალის თვისებების გაუმჯობესებას მისი წყალგამძლეობის გაზრდით და ბიტუმის თავდაპირველი ელასტიკურობის შენარჩუნებით. ამ პოლიმერის გამოყენება განპირობებულია ნედლეულის (ნარჩენები ბოთლების სახით) ხელმისაწვდომობით და მისი მაღალი ფიზიკურ-მექანიკური თვისებებით, როგორცაა სიმტკიცე, ელასტიკურობა, მზის რადიაციისადმი მდგრადობა და ტენიანობის წინააღმდეგობა.

საკვანძო სიტყვები: ასფალტბეტონის საგზაო საფარი; ბიტუმის მოდიფიკაცია; გამძლეობა; პოლიეთილენ ტერეფტალატი; საგზაო ბიტუმი.

შესავალი

ასფალტბეტონის საფარის გამძლეობა საგზაო ინდუსტრიაში ერთ-ერთი ყველაზე აქტუალური საკითხია. გზების გაუმჯობესება ამჟამად რამდენიმე სფეროში მიმდინარეობს, რომელთაგან ერთ-ერთი საგზაო ბიტუმების ფიზიკურ-მექანიკური თვისებების გაუმჯობესებაა.

შემოდგომასა და გაზაფხულზე, ისეთი უარყოფითი ფაქტორების ერთდროული კომბინაცია, როგორცაა საგზაო სამოსსა და მიწისქვეშა ფენაში ჭარბი ტენიანობა, გაყინვა-გაღებობის ციკლების მონაცვლეობა და, შესაბამისად, საფარის სიმტკიცის მნიშვნელოვანი შესუსტება, იწვევს საფარის სწრაფ

დეგრადაციას. ეს ყველაფერი ადასტურებს საგზაო ბიტუმების მოდიფიკაციის კვლევის საჭიროებას, რათა გაუმჯობესდეს მზა მასალის წყალგამძლეობა, შემცირდეს წყლის შთანთქმა და გაიზარდოს ასფალტბეტონის საფარის გამძლეობა.

ძირითადი ნაწილი

დღეისათვის, პოლიმერბიტუმიან მასალებში პრაქტიკულად ყველა ცნობილი პოლიმერი იქნა გამოცდილი. თუმცა, პრაქტიკაში მხოლოდ რამდენიმე ტიპის მაღალი მოლეკულური წონის ნაერთი გამოიყენება. საგზაო ბიტუმის პოლიმერული მოდიფიკაციის მთავარი პრობლემა ის არის, რომ პოლიმერების დამატება მკვეთრად ზრდის ბიტუმის სიბლანტეს. ამ პრობლემის ერთ-ერთი გადაწყვეტა (ბიტუმის თვისებების გაუმჯობესება) არის წვრილად დისპერსიული პოლიმერების ბიტუმში შეყვანა.

ზოგიერთ შემთხვევაში, დადებითი ეფექტი მიიღწევა ერთდროულად რამდენიმე მოდიფიკატორის შეყვანით, რომელთაგან თითოეული აუმჯობესებს მხოლოდ კონკრეტულ თვისებებს. კომპოზიტური შემკვრელების შემთხვევაში, ასეთი კომპონენტები შეიძლება მოიცავდეს პოლიმერს, გამხსნელს, პლასტიფიკატორს ან ზედაპირულად აქტიურ ნივთიერებას. შედეგად მიღებული ეფექტი შეიძლება შეესაბამებოდეს შემკვრელის მოდიფიკაციის პროცესის ეკონომიკურ ხარჯებსა და ტექნოლოგიურ სირთულეებს.

პოლიეთილენტერეფტალატის (პტფ-ის), როგორც ბიტუმის მოდიფიკატორის გამოყენების მცდელობები განხორციელდა, მაგრამ საგზაო ბიტუმის პტფ-ით მოდიფიკაციის თითქმის ყველა

კვლევა იყენებს მექანიკურად დაფქულ პოლიმერს, რაც მკვეთრად ზრდის ამ მასალის ღირებულებას. წარმოდგენილ კვლევაში პოლიმერს მინიჭებული ჰქონდა სტრუქტურირების ფუნქცია: პტფ-ის გამოყენება წვრილად დისპერსიული შემავსებლის სახით, რომელიც არ ზრდის სისტემის სიბლანტეს. პოლიმერი შეყვანილ იქნა დეჰიდრატირებულ BND 60/90 საგზაო ბიტუმში დისპერსიის სახით. რომლებიც წარმოქმნიდა წვრილად დისპერსიულ სისტემას და იგი შედგება მიკრონის ზომის პოლიმერული ნაწილაკებისგან.

გამდნარ ბიტუმს დაემატა პტფ-ის განსაზღვრული რაოდენობა 250°C-ზე მაღალ ტემპერატურაზე. პოლიმერის გახსნის პროცესი მიმდინარეობდა უწყვეტი მორევით, სანამ პოლიმერბიტუმის ნალექი ერთგვაროვანი არ გახდებოდა. როდესაც ტემპერატურა 81°C-მდე დაეცა, ნარევი არსებული პოლიმერი გადავიდა კრისტალურ მდგომარეობაში და მისი კრისტალები ან მოქმედებდნენ როგორც წვრილად დისპერსიული შემავსებელი ბიტუმში, ან ქმნიდნენ საკუთარ სტრუქტურულ ქსელს. ორივე შემთხვევა ხელს უწყობდა ბიტუმის სტრუქტურის ხარისხის ზრდას, რაც აუმჯობესებდა ასფალტბეტონის საფარის ფიზიკურ და მექანიკურ თვისებებს. კომპოზიტური მასალების გამაგრების ეფექტი მატრიცაში წვრილად დისპერსიული შემავსებლის შეყვანით დიდი ხანია ცნობილია. იდეალური კომპოზიტური მასალების ფორმირების ფუნდამენტური პრინციპები ჩამოაყალიბა აკადემიკოსმა პ.ა.რეზინდერმა, (ფიზიკური და ქიმიური მექანიკის ახალი სამეცნიერო დარგის შემქმნელი), რომელიც ამტკიცებდა: „ნებისმიერი მყარი სხეულის სიმტკიცის თითქმის იდეალურ ზღვრამდე გაზრდის უმარტივესი გზაა

მისი ნაწილაკებად დაფქვა, რომელთა სიდიდის რიგი შეესაბამება სახიფათო სუსტ წერტილებს შორის მანძილებს. თუ ასეთი ნაწილაკები მჭიდროდ არის შეფუთული ან ერთმანეთთან მიწებებული უკიდურესად თხელ ფენებად, რომლებიც გამკვრივების შემდეგ ძალიან გამძლეა, შედეგად მიღებული მასალა იქნება მკვრივი, სითხეებისა და აირებისთვის ძალიან გამძლე ან გამძლე“. შემდეგ, გადავდით პოლიმერის სტრუქტურის ანალიზზე. პოლიეთილენტერეფტალატი იხსნება ციკლოჰექსანონში მისი დუდილის ტემპერატურაზე ($b_p = 155,6^{\circ}\text{C}$), რომელიც კარგი გამხსნელია ამ პოლიმერისთვის. 150°C-ზე წარმოიქმნა ერთგვაროვანი ხსნარი, იგი გაგრილებისას გამხსნელში გარდაიქმნა პტფ-ის პოლიმერის დისპერსიად.

მიღებული მონაცემებიდან ირკვევა, რომ შესწავლილ ტემპერატურულ დიაპაზონში ბიტუმისთვის ფაზური გადასვლები არ არის, ხოლო პტფ-ისთვის სამი გადასვლაა: პირველი არის მინად შეცხოვის პერიოდის დაწყება შესაბამის ტემპერატურაზე (76.5°C). მეორე არის პოლიმერის კრისტალიზაციის დაწყების გარემო (155°C). მესამე გადასვლა ხდება თერმული ენერგიის შთანთქმით, დაიწყება დაახლოებით 200°C-ზე დამთავრდება დაახლოებით 260°C-ზე, რაც შეესაბამება ამ პოლიმერის დნობის ტემპერატურის დიაპაზონს.

მიღებულმა მონაცემებმა საშუალება მოგვცა დაგვედგინა ბიტუმის გავლენის ხარისხი პოლიმერის არაერთ თვისებაზე (მინად შეცხოვის, დნობისა და კრისტალიზაციის ტემპერატურა). გარდა ამისა, დადგინდა პოლიეთილენტერეფტალატის მაქსიმალური კონცენტრაცია (ბიტუმში 15% წონით), რომლის დროსაც პტფ შეიძლება დაემატოს საგზაო

ბიტუმის დნობას ბიტუმპოლიმერული სისტემის მაკროჰომოგენურობის შენარჩუნებით. სისტემის ელასტიკურობა იწყებს შემცირებას 20%-ზე მეტი წონით კონცენტრაციისას, რაც იწვევს ნიმუშების ბზარებს. მონაცემების ანალიზმა საშუალება მოგვცა შეგვეფასებინა პოლიმერულ ნარევეში ბიტუმის კონცენტრაციის გავლენა მის ფაზურ გადასვლებზე. ირკვევა, რომ ბიტუმის შედგენილობაში პტფ-ის არსებობა იწვევს პოლიმერის ფაზური გადასვლის

ტემპერატურის შემცირებას. მაგალითად, პოლიეთილენტერეფტალატის (100%) მინად შეცხოვის საწყისი ტემპერატურა არის 81,9°C. ბიტუმის თანაარსებობისას, მინად შეცხოვის ტემპერატურა მცირდება 70,5°C-მდე. ანალოგიურად მცირდება კრისტალიზაციის და დნობის ტემპერატურები. მიღებული მონაცემები წარმოდგენილია პირველ ცხრილში.

ცხრილი 1

კრისტალიზაციის და დნობის ტემპერატურები

ბიტუმის შედგენილობა – პტფ	ტემპერატურა, °C		
	მინად შეცხოვა	კრისტალიზაცია	დნობა
ბიტუმი + 10 % პტფ	72.6	155	244.3
ბიტუმი + 15 % პტფ	70.5	150	234
100 % პტფ	81.9	167.7	246.7

ბიტუმი ასფალტბეტონის ნარევეში მთავარი უწყვეტი ფაზაა, ხოლო მინერალური შემავსებლები, რომლებიც ყველაზე დიდი მოცულობით ფრაქციას იკავებს, დისკრეტული მასალებია. ამ მიზეზით, ბიტუმის ფენა ითვლება წყლის ასფალტ-ბეტონში დიფუზიური გამტარიანობის გავლენის მქონე მთავარ ფაქტორად.

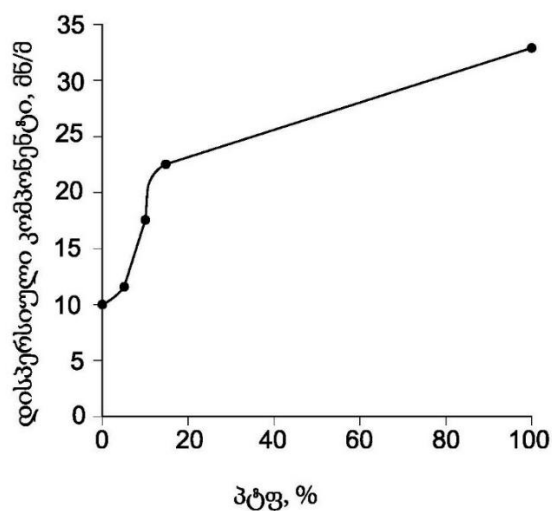
ბიტუმპოლიმერის შედგენილობის ზედაპირუ-

ლი ენერგიის დონე, პოლიმერის შემცველობიდან გამომდინარე, შეფასდა ბიტუმპოლიმერის სისტემის ზედაპირზე გამხსნელების წყვილების კონტაქტის კუთხეების გაზომვით. გამხსნელებად გამოყენებული იყო გამოხდილი წყალი და ბენზოლის სპირტი. მათემატიკური გარდაქმნების შედეგებმა განსაზღვრა ზედაპირული ენერგიის კომპონენტები, რომლებიც წარმოდგენილია მე-2 ცხრილში.

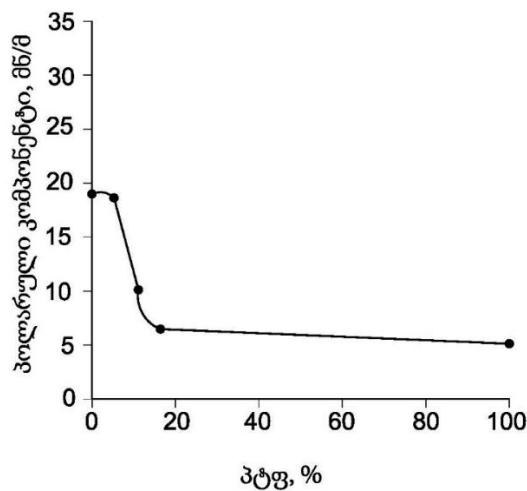
ზედაპირული ენერგიის კომპონენტები

დისპერსიული და პოლარული კომპონენტები პტვ-ის კონცენტრაციის მიხედვით		
კონცენტრაცია პტვ, %	დისპერსიული კომპონენტი, მნ/მ	პოლარული კომპონენტი, მნ/მ
0	9.8	19.2
5	11.38	19.09
10	17.43	10.58
15	22.21	6.96
100	32.83	6.84

პირველ და მეორე სურათებზე წარმოდგენილია დისპერსიული და პოლარული კომპონენტების დამოკიდებულება პოლიმერის კონცენტრაციაზე.



სურ 1. დისპერსიული კომპონენტის დამოკიდებულება პოლიმერის კონცენტრაციაზე



სურ. 2. პოლარული კომპონენტის დამოკიდებულება პოლიმერის კონცენტრაციაზე

სურათებზე ნაჩვენები შედეგების ანალიზიდან აშკარაა, რომ სისტემაში პოლიმერის შემცველობის ზრდასთან ერთად, მასალის ზედაპირული ენერგია იცვლება და ბიტუმის დაახლოებით 20%-ის მასის შემდეგ, ზედაპირული ენერგია პრაქტიკულად მუდმივი რჩება.

ამ მნიშვნელობის მუდმივობა განპირობებულია იმით, რომ ბიტუმის მასასთან მიმართებით პოლიმერის მასის დაახლოებით 15–20%-მდე, ზედაპირული ენერგიის დისპერსიისა და პოლარული კომპონენტების ცვლილებებს შორის საპირისპირო წრფივი დამოკიდებულებები შეინიშნება. დისპერსიის კომპონენტის ზრდა კომპენსირდება პოლარული კომპონენტის შემცირებით. მაღალი კორელაციის კოეფიციენტის მქონე დისპერსიული კომპონენტის ზრდა აღწერილია განტოლებით

$$y = 0,8656x + 8,713 \quad (1)$$

ხოლო პოლარული კომპონენტის შემცირება აღწერილია განტოლებით

$$y = -0,9046x + 20,742 \quad (2)$$

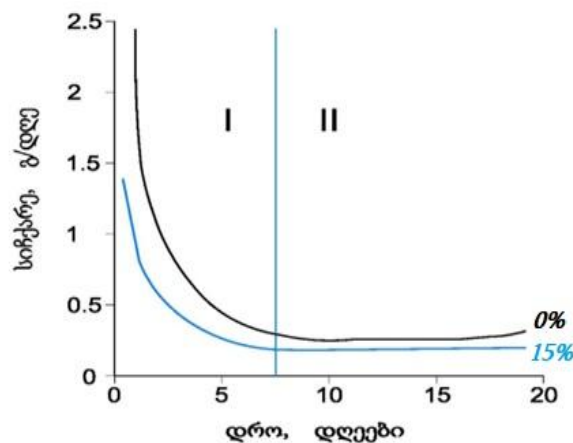
ორივე განტოლების დიფერენცირებით და აბსოლუტური მნიშვნელობის ზრდის კოეფიციენტების (შესაბამისად, 0,8656x და -0,9046x) შედარებით, შესაძლებელია იმის დადგენა, თუ რომელ კომპონენტს აქვს ცვლილების უფრო დიდი სიჩქარე. ზემოთ აღნიშნულიდან გამომდინარე, შეიძლება დავასკვნათ, რომ წყლის შთანთქმის თვალსაზრისით, სისტემაში პტფ პოლიმერის კონცენტრაციის ბიტუმის მასის 15%-ზე მეტად გაზრდა არ არის მიზანშეწონილი, რადგან პოლარული კომპონენტი წყვეტს შემცირებას და სწორედ ეს კომპონენტი განსაზღვრავს წყლის შთანთქმას ძირითადად წყალბადის ბმებისა და დიპოლ-დიპოლური ურთიერთქმედების გამო.

ამჟამად, წყალგამძლეობა ასფალტბეტონის ყველაზე მნიშვნელოვანი მაჩვენებელია. წყალი აღწევს ბიტუმის ფორებში და გაყინვის პერიოდებში კრისტალიზდება, რითაც ფართოვდება და ანადგურებს

ბიტუმის ფენას. ეს უარყოფითად მოქმედებს საფარის არაერთ ფიზიკურ-მექანიკურ თვისებაზე. თეორიულად, ამ სისტემის წყლის შთანთქმის სიჩქარის შემცირება მოსალოდნელი იყო დამატებული პოლიეთილენტერეფტალატის კონცენტრაციის მიხედვით.

წყლის შთანთქმა განისაზღვრა მ.ი.კარიაკინას მიერ შემუშავებული მეთოდის შესაბამისად. მონაცემები წარმოდგენილია მე-3 სურ-ზე.

მაგალითად, სამი დღის შემდეგ, პირველ რეგიონში ნიმუშების მიერ წყლის შთანთქმის სიჩქარე მცირდება. არასტაბილური დიფუზიის რეჟიმში (სურ. 3, რეგიონი I), პოლიმერის გარეშე ნიმუშისთვის წყლის შთანთქმის სიჩქარე მცირდება 2,5 გ/დღეში – 1 გ/დღეში, ხოლო ბიტუმის 15%-იანი პოლიმერის შემცველი ნიმუშისთვის ის მცირდება 1,5 გ/დღეში – 0,4 გ/დღეში.



სურ. 3. ნიმუშში წყლის მასის ზრდის დამოკიდებულება დროზე

I - რეგიონი, არასტაციონარული დიფუზია; II - რეგიონი, სტაციონარული დიფუზია;

ამის საფუძველზე, ასევე შეგვიძლია დავასკვნათ, რომ ბიტუმში 15%-იანი პოლიმერის არსებობა წყლის დიფუზიის სიჩქარეს 2,5-ჯერ ამცირებს.

პირველი რეგიონი არის არასტაბილური წყლის დიფუზია, ხოლო მეორე რეგიონი ასახავს სტაბილური დიფუზიის რეჟიმს, რომელშიც ბიტუმის მოდიფიკატორის, პტფ-ის, ეფექტი მინიმალურია.

დასკვნა

1. მოდიფიკაციისათვის ბიტუმში პოლიეთილენტერეფტალატის შეყვანა აუმჯობესებს მზა მასა-

ლის თვისებებს მისი წყალგამძლეობის გაზრდით და იმავდროულად ბიტუმის თავდაპირველი ელასტიკურობის შენარჩუნებით;

2. საგზაო ბიტუმში პოლიეთილენტერეფტალატის ოპტიმალურ კონცენტრაციად ითვლება ბიტუმის მასის არაუმეტეს 15%;

3. პოლიეთილენტერეფტალატით ბიტუმის მოდიფიცირება ამცირებს მზა მასალის მინად შეცხოვის დაწყების ტემპერატურას, კრისტალიზაციის ტემპერატურას და დნობის ტემპერატურას, რითაც მიიღწევა ახალი თვისებები;

4. პოლიეთილენტერეფტალატით ბიტუმის მო- და, შესაბამისად, ზრდის მზა მასალის წყალ-
დიფიცირება 2.5-ჯერ ამცირებს წყლის დიფუზიის გამძლეობას.
სიჩქარეს, რაც ამცირებს წყლის შთანთქმის სიჩქარეს

ლიტერატურა

1. Meyer, M. F., Jr., Combs, R. L., & Wooten, W. C., Jr. (2012). *Purification of impure scrap poly(ethylene terephthalate)* (U.S. Patent No. 8,293,903). Eastman Kodak Company.
2. Rebinder, P. A. (2019). *Izbrannye trudy. Poverkhnostnye yavleniya v dispersnykh sistemakh. Chast' II: Fiziko-khimicheskaya mekhanika* [Selected works. Surface phenomena in disperse systems. Part II: Physicochemical mechanics]. Nauka.
3. *GOST R 56724-2015 (ISO 11357-3:2011). Plastmassy. Differentsial'naya skaniruyushchaya kalorimetriya (DSK). Chast' 3. Opredelenie temperatury i ental'pii plavleniya i kristallizatsii* [Plastics. Differential scanning calorimetry (DSC). Part 3. Determination of temperature and enthalpy of melting and crystallization]. (2016). Standartinform.
4. *DIN 55660-4:2010-03. Teil 4: Bestimmung des polaren und dispersen Anteils der Oberflächenspannung von Flüssigkeiten aus einer Grenzflächenspannung* [Determination of the polar and dispersive components of the surface tension of liquids from interfacial tension]. (2010). Deutsches Institut für Normung.
5. Karyakina, M. I. (2017). *Laboratornyy praktikum po ispytaniyu lakokrasochnykh materialov i pokrytiy* [Laboratory practical course on testing paints, coatings, and coating materials]. Khimiya.

UDC 625.21

SCOPUS CODE 2205

<https://doi.org/10.36073/1512-0996-2026-3-161-169>

Features of Modification of Road Bitumen with Polyethyleneterephthalate

Tengiz Papuashvili	Georgian Technical University, Faculty of Road Construction, Professor, Georgia E-mail: papuashvilitengizi01@gtu.ge
Aleksi Burduladze	Georgian Technical University, Faculty of Road Construction, Professor, Georgia E-mail: a.burduladze@gtu.ge
Nugzar Rurua	Georgian Technical University, Faculty of Road Construction, Professor, Georgia E-mail: n.rurua@gtu.ge
Giorgi Agniashvili	Georgian Technical University, Faculty of Road Construction, Phd Student, Georgia E-mail: agniashviligiorgi92@gmail.com
Tornike Pochkhidze	Georgian Technical University Masters Student, Faculty of Road Construction, Masters Student, Georgia E-mail: pochkhidzepp@icloud.com

Reviewers:

P. Nadirashvili, Georgian Technical University Faculty of Road Construction, Professor
E-mail: p.nadirashvili@gtu.ge

K. Mchedlishvili, Georgian Technical University Faculty of Road Construction, Professor
E-mail: mtchedlishvilikonstantine01@gtu.ge

Abstract. In recent years, significant knowledge has been accumulated, both on the basis of scientific research and practical experience in the use of modified bitumens, with effective and inexpensive modifiers of greatest interest. However, experience in the use of modified bitumens in asphalt concrete mixtures shows that it is not always possible to achieve the required properties of the finished material. The article presents the results of research related to improving the properties of road bitumen by modifying it with polyethyleneterephthalate. The optimal content of polyethylene terephthalate for bitumen modification was determined, which contributes to improving the properties of the finished material by increasing its water resistance and maintaining the original elasticity of the bitumen. The use of this polymer is due to the availability of raw materials (waste in the form of bottles) and its high physical and mechanical properties, such as strength, elasticity, resistance to solar radiation and resistance to moisture.

Keywords: Asphalt-concrete road surface; durability; road bitumen; polyethyleneterephthalate; bitumen modification.

განხილვის თარიღი 14.05.2026

შემოსვლის თარიღი 08.06.2026

ხელმოწერილია დასაბეჭდად 25.09.2026