

UDC 625.21

SCOPUS CODE 2205

<https://doi.org/10.36073/1512-0996-2026-2-139-145>

## დამატებითი ძალების წარმოქმნაზე სატრანსპორტო საშუალებების მოძრაობის სიჩქარის გავლენის მოდელირება

- თენგიზ პაპუაშვილი** საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის სამშენებლო ფაკულტეტის პროფესორი, საქართველო  
E-mail: papuashvilitengizi01@gtu.ge
- ალექსი ბურდულაძე** საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის სამშენებლო ფაკულტეტის პროფესორი, საქართველო  
E-mail: a.burduladze@gtu.ge
- ნუგზარ რურუა** საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის სამშენებლო ფაკულტეტის პროფესორი, საქართველო  
E-mail: n.rurua@gtu.ge
- გიორგი აღნაშვილი** საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის სამშენებლო ფაკულტეტის დოქტორანტი, საქართველო  
E-mail: agniashviligiorgi92@gmail.com
- თორნიკე ფოჩხიძე** საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის სამშენებლო ფაკულტეტის პროფესორი, საქართველო  
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.** სატრანსპორტო ნაკადის მოქმედებისას წარმოქმნილი ცვეთის სიდიდეების მიღება, დაფუძნებულია დამატებითი ძალების წარმოქმნის ფიზიკური პროცესის მოდელირებაზე, საფარზე სატრანსპორტო ნაკადის დინამიკური ზემოქმედებისას, მის ფორებში წყლის მოძრაობის გათვალის-

წინებით. აუცილებელია ამ წნევის მოძრაობისგან წარმოქმნილი გავლენის შეფასება, რომელიც იწვევს ლიანდის წარმოქმნის დაჩქარებას. საფარის ზედა ფენის რღვევის პროცესი დაკავშირებულია, პირველ რიგში, გარე ძალების მოქმედებასთან. ეს ძალები

სიდიდის მიხედვით განსხვავებულია, მაგრამ მათ წყაროს წარმოადგენს, პირველ რიგში, გაცვეთილი ფენის ზედაპირზე ბორბლის მოძრაობა. ბორბალი კონტაქტის არეში ავითარებს ნორმალურ და მხებ ძაბვებს და თუ ნორმალური ძაბვები დაკავშირებულია სატრანსპორტო საშუალების მასასთან და წნევასთან ბორბლის პნევმატიკში, მხები დეფორმაციები დაკავშირებულია საავტომობილო გზის ზედაპირზე სატრანსპორტო საშუალების მოძრაობის სიჩქარესთან.

სტატიაში განხილულია გზების მშენებლობის ინოვაციური ტექნოლოგიები, კერძოდ გრუნტების გამაგრების მეთოდები.

**საკვანძო სიტყვები:** განტოლება; გარემო; დეფორმაცია; დისკრეტიზაცია; დრეკადი რეაქცია; კონსტრუქცია; სიხისტის მატრიცა.

## შესავალი

აღნიშნული ამოცანის გადაწყვეტა შესაძლებელია დიფერენციალური განტოლებების სისტემების აგებით, რომლებშიც გათვალისწინებულია გარემოსა და კონსტრუქციის პარამეტრებთან დაკავშირებული ყველაზე დამახასიათებელი სიდიდეები. განტოლებების დისკრეტიზაციის მეთოდის სახით ხელსაყრელია საბოლოო ელემენტების მეთოდის შერჩევა, რომელიც იძლევა, დატვირთვის შემოქმედებით, საფარის დეფორმაციების სიდიდეების, როგორც სტატიკურ, ისე დინამიკურ რეჟიმებში, ფორების დეფორმაციების და მათში მზარდი

ჰიდროდინამიკური წნევის განსაზღვრის საშუალება. ვინაიდან, დეფორმაციის სიდიდე შეიძლება იყოს ელემენტის ზომასთან ახლოს, ძირითად გამოთვლით მეთოდს წარმოადგენს გადაადგილებების მეთოდი. ის იძლევა სიხისტის მატრიცების, საფარის ფენის საბოლოო ელემენტების სხვადასხვა კვანძისთვის, დატვირთვისა და ძაბვების ვექტორების შექმნის საშუალებას, აღნიშნული ფიზიკური პროცესისთვის დამახასიათებელი მოცემული ზღვრული პირობების გათვალისწინებით.

## ძირითადი ნაწილი

გამოთვლითი მეთოდის თეორიულ საფუძველს წარმოადგენს საბოლოო ელემენტების მეთოდი გადაადგილებების მეთოდის ფორმით და ჰიდროდინამიკური ამოცანების გადაწყვეტა ცვლადი ზღვრული პირობების მეთოდით. მათემატიკური მიდგომის საფუძველს წარმოადგენს „კომის ამოცანის გადაწყვეტა დრეკადი სივრცისთვის დარტყმითი კომპონენტის წარმოქმნით საფართან ბორბლის კონტაქტის წერტილში. მოცემული ამოცანა სიმეტრიულია და გადაგვარდება ნახევარსივრცის დრეკადი კომპონენტისათვის ამოხსნაში მოცემული ზღვრული პირობებით.

ზედაპირზე ავტომობილის მოძრაობის დინამიკური ამოცანის ამოსახსნელად, წარმოქმნილი დინამიკური ძალებისა და ფორებში წყლის წნევის გათვალისწინებით, აუცილებელია საფარის ჩაღუნვის სიდიდის განსაზღვრის სტაციონარული ამოცანის ამოხსნა, მდებარე დრეკად საფუძველზე, საფარის დრეკადი რეაქციის მქონე ეკვივალენტური ფართობის შტამპის მოძრაობისას.

დეფორმაციის მუშაობა ბორბლის ბრუნვისას აღიქმება სამუშაო სხეულით და სალტის გარე მასალით, ხარჯავს რა 70-80% ჰაერის დაწოლაზე, 20-30% ბორბლის მასალაზე. ბორბლის პნევმატიკის ჩალუნვის სიდიდე შეიძლება გამოისახოს ფორმულით:

$$H = P/(\pi q(DB))^{-1/2}, \quad (1)$$

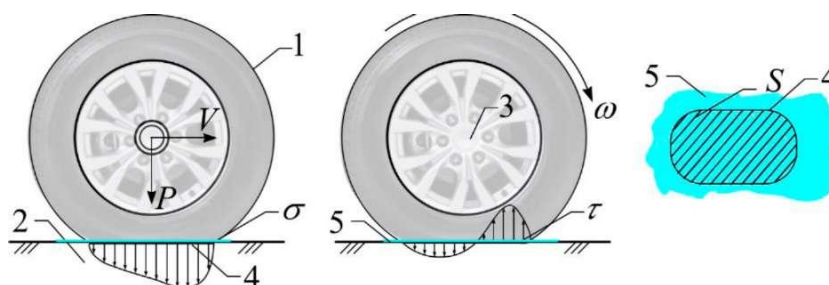
სადაც  $P$  არის დატვირთვა ბორბალზე;  $q$  – ჰაერის წნევა სალტის პნევმატიკში;  $D, B$  – შესაბამისად

ბორბლის გარე დიამეტრი და მისი სიგანე.

რხევის წინააღმდეგობაზე, ცირკულაციის სიმძლავრისა და დიდი მხები ძაბვების წარმოქმნის გამო, გავლენას ახდენს ბორბლის რხევის რადიუსი:

$$r_{რხევა} = (2\pi n)^{-1}, \quad (2)$$

სადაც  $n$  არის ბრუნების რაოდენობა სიგრძის ერთეულზე.



სურ.1. ნორმალური და მხები ძაბვების სიდიდეების განაწილება საფარში სატრანსპორტო საშუალების ბორბლის ქვეშ საფარის დატენიანებული მდგომარეობისას:

- 1 - ავტომობილის ბორბალი, 2 - გზის საფარი, 3 - ავტომობილის ღერძი, 4 - ბორბლის ანაბეჭდი, 5 - საფარის დატენიანების უბანი.

სალტის ცვეთა იქნება მინიმალური, ხოლო წნევის განაწილება თანაბარზომიერი, თუ ექსპლუატაციის პროცესში დაცულია  $P$  წნევის ოპტიმალური თანაფარდობა სალტის გზასთან კონტაქტის ადგილზე და სალტის შიგნით. გამოვლენილია, რომ ავტომობილის მოძრაობისას სხვადასხვა რეჟიმში მხებ ძაბვებს აქვს ნიშანცვლადი ხასიათი (სურ. 1).

მოძრაობის რეჟიმების შესარჩევად, რომლის დროსაც წარმოიქმნება ხაზური დამოკიდებულებების დამრღვევი პროცესები, გათვალისწინებულია სალტის დეფორმაცია. მასზე მოქმედებს პნევმატიკის შიდა წნევა, ის ცვლის სალტის ფერსოს სიხისტეს, რაც იწვევს როგორც მხები, ისე ნორმალურ

ძაბვების ცვლილებას, ასევე ზრდის სიმძლავრის ცირკულაციას ბორბლის პერიმეტრის გასწვრივ. ჰაერის წნევა ავტომობილის ბორბლის პნევმატიკში მოქმედებს ორთქლის წნევის ზღვრული სიდიდის ზრდაზე და საფარის ფენის ცვეთაზე. წნევა ბორბლის პნევმატიკში ზენორმატიული დატვირთვებისას მკვეთრად იზრდება. ხოლო დამატებითი ძალის არსებობა ვლინდება საფარის ცვეთის ზრდაში.

ჯერ ერთი, წნევის მომატებით იზრდება პროტექტორის დაწოლის დეფორმაცია, მეორეც, რაც მეტია წნევა, მით ახლოს არის შეკუმშული სალტის კონფიგურაცია მის წონასწორულ კონფიგურაციასთან, შესაბამისი მაქსიმალური მოცულობისას.

ჰაერის დაწოლის მუშაობა  $f$  სალტის ჩალუნვისას განისაზღვრება, როგორც

$$A_g = p\Delta V, \quad (3)$$

სადაც  $P$  არის ჰარბი შიდა წნევა,  $\Delta V$  – მოცულობის გაზომილი ცვლილება.

სრული მუშაობა დახარჯული სალტის დაწოლაზე, ტოლია

$$A = \int_0^f Qdf. \quad (4)$$

სხვაობა სრულ მუშაობასა და ჰაერის დაწოლის მუშაობას შორის წარმოადგენს მუშაობას, დახარჯულს სალტის მასალის დეფორმაციაზე:

$$A_M = A - A_g. \quad (5)$$

სატრანსპორტო ნაკადის ზემოქმედებისას წარმოქმნილი ცვეთის სიდიდეების მიღება, დაფუძნებულია დამატებითი ძალების წარმოქმნის ფიზიკური პროცესის მოდელირებაზე, საფარზე სატრანსპორტო ნაკადის დინამიკური ზემოქმედებისას, მის ფორებში წყლის მოძრაობის გათვალისწინებით. აუცილებელია ამ წნევის მოძრაობისგან წარმოქმნილი გავლენის შეფასება, რომელიც იწვევს ლიანდის წარმოქმნის დაჩქარებას.

საფარის ზედა ფენის რღვევის პროცესი დაკავშირებულია, პირველ რიგში, გარე ძალების მოქმედებასთან. ეს ძალები სიდიდის მიხედვით განსხვავებულია, მაგრამ მათი წყარო, პირველ რიგში, არის გაცვეთილი ფენის ზედაპირზე ბორბლის მოძრაობა. ბორბალი კონტაქტის არეში ავითარებს ნორმალურ და მხებ ძაბვებს. და თუ, ნორმალური ძაბვები დაკავშირებულია სატრანსპორტო საშუალების მასასთან და წნევასთან ბორბლის პნევმატიკში, მხები დეფორმაციები დაკავშირებულია

გზის ზედაპირზე სატრანსპორტო საშუალების მოძრაობის სიჩქარესთან.

$$\left. \begin{aligned} E_x &= \frac{\delta u_x}{\delta x} + \frac{1}{2} \left( \frac{\delta u_z}{\delta x} \right)^2, \\ E_y &= \frac{\delta u_y}{\delta y} + \frac{1}{2} \left( \frac{\delta u_z}{\delta y} \right)^2, \\ E_z &= \frac{\delta u_z}{\delta z} + \frac{1}{2} \left( \frac{\delta u_z}{\delta z} \right)^2, \end{aligned} \right\}$$

სადაც  $G$  არის საფარის ზედა ფენის დაძვრის დეფორმაცია;  $E$  – ასფალტბეტონის დრეკადობის მოდული.

ფორების გადახურვა ბორბლის კონტაქტის მომენტში, იწვევს მათ იზოლაციას, ხოლო საფარის დეფორმაცია, ჯამში წყლის დაწნევის დარტყმით მოქმედებასთან, არღვევს საფარის მასალის სტრუქტურას.

ნაკადის სატრანსპორტო საშუალება მოძრაობს  $V$  სიჩქარით კოორდინატების სისტემაში დადებითი მიმართულებით, ბორბლის სალტის დამწვევი ნაწილის ფრონტისკენ.  $\omega$  ჩალუნვები აღწერილია ეილერის მეორე რიგის დიფერენციალური განტოლებით, დამახასიათებელი საფარის ზედაპირზე მოძრაობის პნევმატიკის მუშაობისთვის

$$(T - P_r)^2 \frac{d^2 \omega}{ds^2} + k_1 \frac{d\omega}{ds} - k\omega = -Q, \quad (6)$$

სადაც  $T$  არის გამჭიმი ძალვა პნევმატიკში,  $k$  – დრეკადი საფუძვლის სიხისტე,  $P_r$  – სატრანსპორტო საშუალების წონა,  $V$  – რხევის სიჩქარე;  $k_1$  კოეფიციენტი ახასიათებს მიღევას.

როგორც ვხედავთ (6) არის მეორე რიგის დიფერენციალური განტოლება საძებნი  $\omega$  სიდიდის მიმართ. რადგან ის არის მეორე რიგის დიფერენციალური განტოლება, ცხადია, მას სჭირდება, რომ ამოიხსნას ორი სასაზღვრო პირობა. აღნიშნული

ორი სასაზღვრო პირობით განისაზღვრება ის ორი მუდმივა, რომლებიც მოცემულია ქვემოთ (7 და 8).

მუშაობა საფარის ჩაღუნვისას სატრანსპორტო საშუალების წონის პროპორციულია; და თუ საფარის ჩანაღუნი განსაზღვრავს ზღვრულ პირობას  $\delta$  ერთგვაროვანი განტოლებისთვის,  $\omega = e^{\alpha}$ , მაშინ, ცვლილების განხორციელებისა და  $e^{\alpha}$ -ზე შეკვეცის შემდეგ მივიღებთ მეორე რიგის განტოლებას  $c$  კოეფიციენტთან მიმართებით, რომელსაც აქვს ორი მნიშვნელობა:

$$c_1 = \sqrt{\frac{(k_1^2 + 4R(T - \mu v^2) + k_1)}{2(T - \mu v^2)}}, \quad (7)$$

$$c_2 = \sqrt{\frac{(k_2^2 + 4R(T - \mu v^2) + k_2)}{2(T - \mu v^2)}}. \quad (8)$$

სანამ ბორბლის რხევის  $V$  სიჩქარე მცირეა,  $c_1$  სიდიდე უარყოფითია, ხოლო  $c_2$  – დადებითი და, შესაბამისად, (6) განტოლებას აქვს ორი ამონახსნი:  $\omega_1 = Ae^{c_1 s}$  და  $\omega_2 = Be^{c_2 s}$ , სადაც  $A$  და  $B$  მოდელის მუდმივი თავისუფალი ნაწილებია ბორბლის ზედაპირთან კონტაქტის ზონის სავარაუდო უბანში.  $V_{kp} > (T/P)^{1/2}$  სიჩქარისას ზედაპირი მცირედ დეფორმირდება და ზემოქმედება წარმოადგენს სალტის პერიმეტრზე გადაადგილებულ ტალღას. თუ რხევის სიჩქარე  $V_{kp}$ -ზე მეტია, მაშინ საბურავის მასალა მასზე გავრცელებულ დეფორმაციაზე უფრო სწრაფად მოძრაობს, რაც გამოწვეულია კონტაქტის ზონაში დართული დატვირთვით.

ბორბლის რხევა  $V_{kp}$ -ზე მეტი სიჩქარით, იწვევს თავმოყრილი  $Pu_j$  დარტყმითი ძალის წარმოქმნას, რომლის განსაზღვრა ადვილია, განვიხილავთ რა მოძრაობის რაოდენობის ცვლილებას საფართან

კონტაქტში შესვლისას. ძალის იმპულსის პროპორციული მოძრაობის რაოდენობის ცვლილება

$$Pu_j = (Pu^2 - T) \sin \varphi. \quad (9)$$

თუ დავუშვებთ, რომ  $\sin \varphi \approx (2\omega/R)^{1/2}$ , წარმოვიდგინოთ  $Pu$  დარტყმითი ძალა და  $Mu$  მომენტი მოდელის ღერძთან მიმართებით შემდეგი სახით:

$$Pu_j = \left( \frac{V^2}{V_{kp}^2} - 1 \right) \sqrt{2 \frac{\omega}{R}}, \quad Mu_j \approx T \left( \frac{V^2}{V_{kp}^2} - 1 \right) 2\omega. \quad (10)$$

მოქმედი მომენტისა და საფარის ჩაღუნვის შეპირისპირებისას მოძრაობის ცნობილ განტოლებებთან, სატრანსპორტო ნაკადისთვის, შეგვიძლია განვსაზღვროთ წნევის საშუალო ნამატი საფარის ზედაპირზე.

$\Phi$  გრძივი შეჭიდების კოეფიციენტის გაანგარიშება გამოცდების მონაცემების მიხედვით, უკანა წამყვანი ბორბლების სრული ბუქსაობისას, განისაზღვრება ფორმულით:

$$\varphi = P_\delta / Q_3, \quad (11)$$

სადაც  $P_\delta$  არის დინამომეტრის ჩვენება;  $Q_3$ , – დატვირთვა უკანა ბორბლებზე, განსაზღვრული როგორც

$$Q_3 = \frac{G_\alpha + P_\delta h}{L}, \quad (12)$$

სადაც  $G$  არის სატრანსპორტო საშუალების წონა;  $L$  – ავტომობილის ბაზა;  $\alpha$  – მანძილი ჰორიზონტალურად წინა ბორბლების კონტაქტის შუა ნაწილიდან ავტომობილის სიმძიმის ცენტრის წერტილის პროექციამდე ჰორიზონტალზე;  $h$  – ბუქსირის ტროსის დამაგრების სიმაღლე.

ბორბლის ნაწილობრივი სრიალისას დამატებით უნდა იყოს გათვალისწინებული წინა ბორბლების რხევის წინააღმდეგობის ძალა  $P_{f1}$ . ამ შემთხვევაში

$$\varphi = \frac{P_d - P_{f1}}{Q_3} \quad (13)$$

მოყვანილი ფორმულა მართებულია უკანა ბორბლების სრული ან არასრული დამუხრუჭების დროს. დატვირთვა უკანა ბორბლებზე განისაზღვრება შემდეგი გამოსახულებით:

$$Q_3 = \frac{G_a - P_o h}{L} \quad (14)$$

წინა ბორბლების რხევისადმი წინააღმდეგობის ძალა შეიძლება განისაზღვროს ავტომობილის ბუქსირებით, უკანა ბორბლების ნახევარღერძებისგან მოხსნისას. წინა ბორბლების რხევისადმი წინააღმდეგობის ძალა განისაზღვრება როგორც მიღებული წევის ძალვის ნაწილი, ამ ბორბლებზე დატვირთვის პროპორციულია.

## დასკვნა

ავტომობილის ბორბლების საავტომობილო გზის ზედა ფენასთან ურთიერთქმედებისა და მის შედეგად მიღებული ფიზიკური პროცესების შემსწავლელი კვლევების ანალიზიდან შესაძლებელია შემდეგი დასკვნის გამოტანა.

გზის სამოსის რღვევისკენ მიმავალი ყველა ფაქტორის გათვალისწინება, რაც იწვევს ნარჩენ დეფორმაციებსა და შეუქცევად ცვლილებებს, მოითხოვს არა მხოლოდ საფარის მასალის პლასტიკური დეფორმაციისა და გზის კონსტრუქციის გადახრის დადგენას, არამედ გზის ზედაპირის ცვეთის, მათ შორის მისი სველი მდგომარეობის როგორც ცალკეული ფიზიკური პროცესის შესწავლას.

## ლიტერატურა

1. AASHTO. (2015). *Standard method of test for estimating fatigue resistance of asphalt binders using the linear amplitude sweep* (AASHTO TP 101-12).
2. Bahia, H. U., et al. (2010). *Characterization of modified asphalt binders in Superpave mix design*.
3. Badalyan, A. M., et al. (2016). Modeling energy and environmental characteristics of urban transport flows based on remote monitoring data. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences (TiSU)*.
4. Kozlov, V. A., & Kotov, A. I. (2017). Modeling the destruction of asphalt concrete pavement from the dynamic impact of water. *Scientific Journal of Construction and Architecture*.
5. Louis, H., Pude, F., & von Rad, C. (2013). Potential of polymeric additives for the cutting efficiency of abrasive waterjets. In *Proceedings of the 2003 Waterjet Conference*. Houston, TX.
6. Pershin, M. N. (2007). Strengthening gravel materials with cement at negative temperatures. *Highways*.

UDC 625.21

SCOPUS CODE 2205

<https://doi.org/10.36073/1512-0996-2026-2-139-145>

## Modeling the Influence of Vehicle Speed on the Generation of Additional Forces

<b>Tengiz Papuashvili</b>	Georgian Technical University, faculty of construction, professor, Georgia E-mail: papuashvilitengizi01@gtu.ge
<b>Aleksi Burduladze</b>	Georgian Technical University, faculty of construction, professor, Georgia E-mail: a.burduladze@gtu.ge
<b>Nugzar Rurua</b>	Georgian Technical University, faculty of construction, professor, Georgia E-mail: n.rurua@gtu.ge
<b>Giorgi Agniashvili</b>	Georgian Technical University, Faculty of construction, PhD student, Georgia E-mail: agniashviligiorgi92@gmail.com
<b>Tornike Pochkhidze</b>	Georgian Technical University, Faculty of construction professor, Georgia E-mail: pochkhidzepp@icloud.com

### Reviewers:

**P. Nadirashvili**, Georgian Technical University Faculty of Construction, Professor

E-mail: p.nadirashvili@gtu.ge

**K.Mchedlishvili**, Georgian Technical University Faculty of Construction, Professor

E-mail: mtchedlishvilikonstantine01@gtu.ge

**Abstract.** The article discusses innovative technologies for road construction, in particular methods of soil reinforcement. Obtaining the values of wear arising from the action of the traffic flow is based on modeling the physical process of the formation of additional forces during the dynamic impact of the traffic flow on the pavement, taking into account the movement of water in its pores. It is necessary to assess the influence arising from this pressure movement, which leads to the acceleration of rutting. The process of destruction of the upper layer of the pavement is primarily associated with the action of external forces. These forces vary in magnitude, but their source is, first of all, the movement of the wheel on the surface of the worn layer. The wheel develops normal and shear stresses in the contact area. And if the normal stresses are related to the mass of the vehicle and the pressure in the tire, then shear deformations are related to the speed of the vehicle on the road surface.

**Keywords:** Deformation; Discretization; Elastic response; Environment; Equation; Stiffness matrix; Structure.

---

*განხილვის თარიღი 06.02.2026*

*შემოსვლის თარიღი 16.02.2026*

*ხელმოწერილია დასაბეჭდად 26.06.2026*