

UDC 624.191

SCOPUS CODE 2215

<https://doi.org/10.36073/1512-0996-2026-2-153-163>

## სამაგრისა და გარემომცველი მასივის ერთობლივი მუშაობა გვირაბის ეტაპობრივი მშენებლობის პროცესში სამაგრისა და ქანის არაწრფივი მუშაობის გათვალისწინებით

**ლავრენტი გუდავაძე** საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის სამთო-გეოლოგიური და მთის მდგრადი განვითარების ფაკულტეტის პროფესორი. საქართველო  
E-mail: z.gudavadze@gtu.ge

### რეცენზენტები:

**ი. გუჯაბიძე**, საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის სამთო-გეოლოგიური და მთის მდგრადი განვითარების ფაკულტეტის პროფესორი

E-mail: I.k.gujabidze@gmail.com

**ზ. ლებანიძე**, საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის სამთო-გეოლოგიური და მთის მდგრადი განვითარების ფაკულტეტის ასოცირებული პროფესორი

E-mail: z.lebanidze@gtu.ge

**ანოტაცია.** სტატიაში განხილულია „სამაგრი-გარემომცველი მასივი“ სისტემის ერთობლივი მუშაობა დიდი კვეთის გვირაბის ეტაპობრივი მშენებლობის პროცესში სამაგრისა და ქანის არაწრფივი მუშაობის გათვალისწინებით. კვლევის მიზანი იყო გვირაბის ეტაპობრივი გაყვანის ეფექტის შეფასება უეცარი გაყვანის სქემასთან შედარებით და სისტემის ფიზიკური, გეომეტრიული და დატვირთვის არაწრფივობების გავლენის განსაზღვრა. გაანგარიშებები შესრულებულია სასრულ ელემენტთა მეთოდით, ორციკლიანი (გარე და შიდა ციკლების) სქემის გამოყენებით. შეფასებულია გაჭიმვისა და ძვრის ბზარების წარმოქმნის პირობები, ძაბვების გადანაწილება და რღვევის ზონების განვითარება მა-

სივში. მიღებული შედეგები აჩვენებს, რომ არაწრფივი გაანგარიშება მნიშვნელოვნად ცვლის ძაბვა-დეფორმირებული მდგომარეობის სურათს, ამცირებს სამაგრზე მოქმედ დატვირთვებს თაღოვან ნაწილში და იწვევს რღვევის ზონების გავრცელებას მასივის სიღრმეში. დადგენილია დათმობის კვანძების მნიშვნელოვანი გავლენა კონსტრუქციის გადაადგილებებსა და დატვირთვების გადანაწილებაზე.

### საკვანძო სიტყვები:

არაწრფივი გაანგარიშება; გვირაბი; დათმობის კვანძი; ეტაპობრივი მშენებლობა; რღვევის ზონა; სამაგრი; სასრულ ელემენტთა მეთოდი; ქანთა მასივი; ძაბვა-დეფორმირებული მდგომარეობა.

## შესავალი

დიდი კვეთის გვირაბების მშენებლობა, როგორც წესი ეტაპორივად მიმდინარეობს, რასაც გვირაბების სამაგრი კონსტრუქციების გაანგარიშების არსებული მეთოდები არ ითვალისწინებს. ამიტომ, კვლევის ძირითადი მიზანი იყო სისტემის „სამაგრი-ქანთა მასივის“ გაანგარიშების დროს გვირაბის ეტაპობრივი მშენებლობის ეფექტის გამოვლენა, უეცარი გაყვანის სქემასთან შედარებით და, ამავე დროს, სისტემის არაწრფივი მუშაობის გავლენის შეფასება. აქედან გამომდინარე, განხილული იქნა გაანგარიშებები გვირაბების მშენებლობის შემდეგი სქემებისათვის:

- გვირაბის უეცარი გაყვანის სქემა;
- გვირაბის ეტაპობრივი გაყვანის სქემა სისტემის არაწრფივი მუშაობის გათვალისწინებით.

## ძირითადი ნაწილი

გაანგარიშების შედეგად მიიღება ძალის კვანძებში  $U_x$ ,  $U_y$  გადაადგილებები, ხოლო ელემენტებში – დეფორმაციებისა და ძაბვათა კომპონენტები, აგრეთვე მთავარი ნორმალური და მხები ძაბვები და ძაბვის ტრაექტორიები. ანგარიში წარმოებდა სასრულ ელემენტთა მეთოდით [Amusin, B. Z., & Fadeev, A. B. (1975)].

ჩატარებული კვლევებით შესწავლილია სამაგრისა და გარემომცველი მასივის ერთობლივი მუშაობა გვირაბის ეტაპობრივი მშენებლობის პროცესში სამაგრისა და ქანის არაწრფივი მუშაობის გათვალისწინებით. გაანგარიშების დროს გათვალისწინებული იყო არაწრფივი მუშაობის სამივე ძირითადი მომენტი.

ფიზიკური, კონსტრუქციული (გეომეტრ.) და დატვირთვის არაწრფივობები.

ქანის რღვევა ძირითადად განპირობებულია გამჭიმავი და ძვრის ძალების მოქმედებით, რაც დაკავშირებულია შესაბამისად გაჭიმვისა და ძვრის ბზარების გაჩენასთან.

გაჭიმვის ბზარის გაჩენის შეფასება ხდებოდა მაქსიმალური გამჭიმავი ძაბვების მნიშვნელობებით, კერძოდ, ამ შემთხვევაში რღვევის პირობას აქვს სახე:

$$\sigma_{\min} \geq R_s,$$

სადაც:

$\sigma_{\min}$  არის მინიმალური გამჭიმავი ძაბვა, რომელიც მოქმედებს  $\Theta$  კუთხით დახრილ ფართობზე;

$R_s$  – საანგარიშო წინაღობა გაჭიმვაზე.

იმ შემთხვევაში, როდესაც გაჭიმვის ბზარები არ წარმოიქმნება ( $\sigma_{\min} < R_s$ ), განსახილველი არის რღვევის საკითხი მოწმდება ძვრის პირობების შეფასებით. ამდენად, ძვრის ბზარების გაჩენის შესაძლებლობის შეფასება ხდება ძვრაზე მარაგის კოეფიციენტის მიხედვით:

$$\eta = \frac{\tau_{\alpha b}}{\tau_{\alpha}},$$

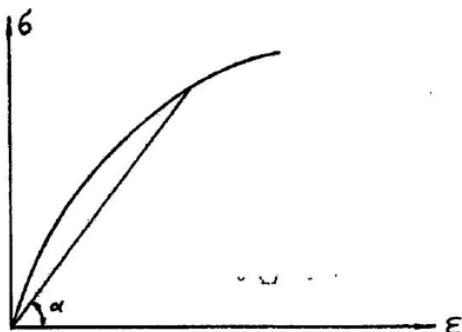
სადაც:

$\tau_{\alpha}$  არის განსახილველ წერტილში  $\alpha$  კუთხით დახრილი ძვრის ყველაზე საშიშ სიბრტყეში მოქმედი მხები ძაბვა;

$\tau_{\alpha b}$  – ქანის საანგარიშო წინაღობა ძვრის ძალაზე იმავე სიბრტყეში.

გაჭიმვის ზონაში, როდესაც  $\sigma_{\min} > R_s$  და  $\eta > 1$ , ჩნდება გაჭიმვის ბზარი, რასაც თან ახლავს ფიზიკური მახასიათებლების შესაბამისი ცვლილებები. კუმ-

ვის ზონაში, როდესაც  $\eta > 1$ , მასალის დეფორმაციის მოდული კორექტირდება  $\sigma$ - $\epsilon$  მრუდის მიხედვით (სურ. 1). როდესაც  $\eta < 1$ , ჩნდება ძვრის ზხარი.

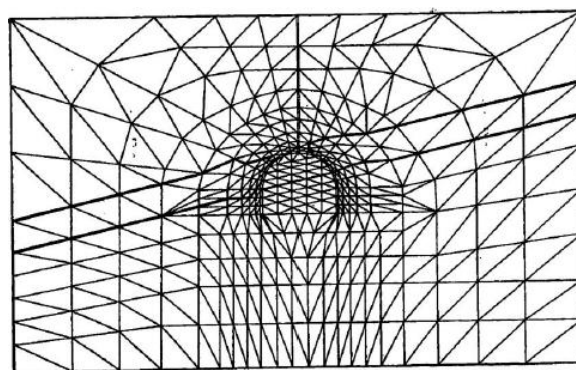


სურ.1. დეფორმაციის ძაბვაზე დამოკიდებულების გრაფიკი.

კონსტრუქციულ არაწრფივობას ძირითადად ექვემდებარება დათმობის კვანძი, რომელიც თალს აძლევს დამოუკიდებლად გადაადგილებების საშუალებას. მისი ღერძის გასწვრივ, გაანგარიშებებში გათვალისწინებული იყო აგრეთვე გეომეტრიული არაწრფივობა ნარჩენი დეფორმაციები მასივში. ამ დროს საანგარიშო ბადის კვანძები თითოეული იტერაციული ციკლის ბოლოს განიცდიდა კორექტირებას კვანძურ გადაადგილებათა მნიშვნელობების მიხედვით.

გვირაბის გაყვანისას, თანმხლებ რღვევის მოვლენებთან დაკავშირებით, სამაგრისა და მასივის ცალკეულ უბნებში ადგილი აქვს დატვირთვისა და განტვირთვის პროცესებს – არსებული დატვირთვების გადანაწილებას. აღნიშნულ პროცესებთან დაკავშირებით დამატებითი მდგომარეობის ცვლილებებს საანგარიშო სქემის ბადის კვანძებში თანახლავს შესაბამისი რეაქტიული ძალების ვარირება, რაც განაპირობებს დატვირთვის არაწრფივობას.

განგარიშებებში განხილულია გვირაბის გაყვანის 2-ეტაპიანი სქემა. პირველ ეტაპზე მიმდინარეობს გვირაბის ზედა ნაწილის გაყვანა და შესაბამისი ნაწილის გამაგრება, ხოლო გარკვეულ მანძილზე გაყვანის შემდეგ ამუშავებენ გვირაბის ქვედა ნაწილს და აყენებენ სამაგრის სრულ კონსტრუქციას. აღნიშნულის შესაბამისად გაანგარიშებების დროს საანგარიშო სქემაში თანამიმდევრულად განიხილებოდა თავდაპირველად პირველი, შემდეგ კი მეორე რიგის მშენებლობები, გვირაბის დამუშავების შესაბამისი კვეთებითა და სამაგრის კონსტრუქციის ნაწილების გათვალისწინებით (სურ. 2.).



სურ. 2. „სამაგრი-გარემომცველი მასივის“ სისტემის საანგარიშო სქემა.

გვირაბის გაყვანისას თანმხლები რღვევის პროცესებისა და სამაგრის კონსტრუქციაზე დატვირთვების თანამიმდევრული გადაცემის გასათვალისწინებლად გაანგარიშებებში გამოყენებულია 2-ციკლიანი სქემა გარე და შიგა ციკლებით.

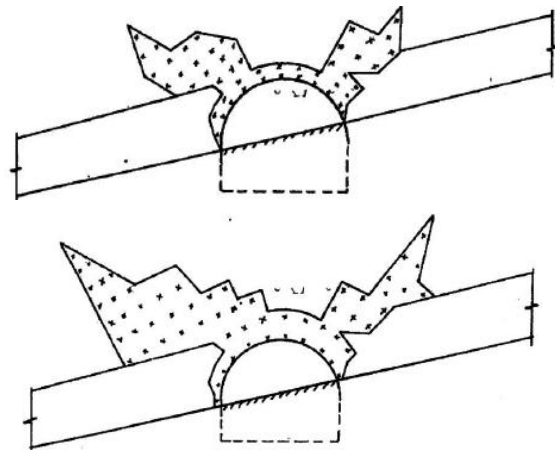
გარე ციკლებში განიხილებოდა საანგარიშო სქემა, რომელშიც ელემენტებისა და კვანძების თანამიმდევრული გამორიცხვა ხდებოდა გვირაბის მშენებლობის ეტაპების შესაბამისად, ხოლო შიგა

ციკლებში დატვირთვების  $\Delta F$  ბიჯი განისაზღვრა საანგარიშო სისტემის „სამაგრი-გარემომცველი მასივის“ I რიგის მშენებლობის შესაბამისი დატვირთვის  $\{F\}$  ვექტორის მიხედვით, მასში მასივის ბუნებრივი დამაბული მდგომარეობის გათვალისწინებით.  $\Delta F = \frac{\{F\}}{n}$ , სადაც  $n$  შიდა ციკლების რაოდენობაა. აღნიშნული ბიჯი შეირჩა იმ პირობით, რომ დატვირთვის მატებისას ადგილი არ ჰქონოდა დამაბული მდგომარეობის მკვეთრ ცვლილებებს და დამაბული მდგომარეობის მდორე ცვლილებისას გამოვლენილიყო რღვევის ზღვრული მდგომარეობების ( $\eta \leq 1$ ) შესაბამისი ძაბვის კომპონენტები. სულ ჩატარდა 12 ციკლი, საიდანაც 8 შეესაბამებოდა პირველ, ხოლო 4 – მეორე რიგის მშენებლობებს.

როგორც გაანგარიშების შედეგებით იქნა მიღებული, ზემოთ ხსენებული სისტემის არაწრფივობამ გვირაბის გაყვანის პროცესის გათვალისწინებით მნიშვნელოვანი გავლენა მოახდინა სამაგრსა და გარემომცველი მასივის დამაბულ-დეფორმირებული მდგომარეობის ჩამოყალიბებაში.

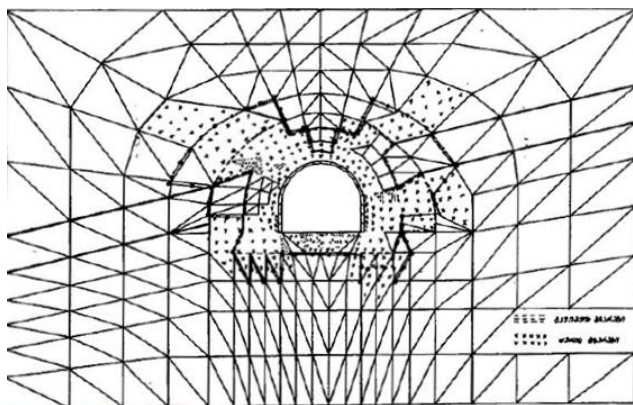
გაანგარიშების III ციკლში დაფიქსირდა რღვევის პროცესები, რომლებშიც ძირითადად სამაგრსა და გარემომცველ მასივს შორის არსებული ამოყორვის შრეში მიღებულმა შედეგებმა გვიჩვენა, რომ რღვევები ამ ზონებში ძირითადად ძვრის შედეგად განვითარდა ( $\eta < 1$ ), თუმცა სამაგრის მარჯვენა კედლის მხარეს წარმოიქმნა გაჭიმვის ბზარებიც ( $\sigma_{\min} > R_b$ ). გაანგარიშების შემდგომ ციკლებში რღვევა სამაგრის კონტურის მიმდებარე ზონებში და მასივის სიღრმეში ზედა მარცხენა და მარჯვენა კუთხეების მიმართულებით ქვანახშირის ზოლის გასწვრივ განვითარდა (სურ. 3.).

ამდენად, გვირაბის გაყვანის I რიგის მშენებლობამ (I – VIII ციკლები) მასივში ჩამოყალიბდა რღვევის ძირითადი არე. მეორე რიგის მშენებლობამ (IX – XII ციკლები) განავითარა გაანგარიშების წინა ციკლებში წარმოქმნილი რღვევის ზონები, უპირატესად გვირაბის განივად და ფუძის სიღრმისაკენ (სურ. 4). ამდენად, რღვევის ზონამ მასივის მნიშვნელოვანი არეები მოიცვა და მის სიღრმეში გვირაბის გაორმაგებული დიამეტრის მანძილით გავრცელდა, რაც მნიშვნელოვნად აღემატება წრფივი გაანგარიშების შედეგად წარმოდგენილ არეს.



სურ. 3. რღვევის არეების განვითარება მასივში გვირაბის I ეტაპის დამუშავებისას (არაწრფივი გაანგარიშება).

რღვევის ზონების განაწილების არასიმეტრიული ხასიათი მასივის ანიზოტროპიულობის გავლენაზე მიუთითებს. უკანასკნელის შესაფასებლად განხილული იქნა შემთხვევა, რომლის დროსაც გვირაბის გარემომცველი მასივი განიხილებოდა როგორც იზოტროპული და ერთგვაროვანი. ამ შემთხვევაში რღვევის ზონა მასივის ანიზოტროპიულობის ვარიანტთან შედარებით მნიშვნელოვნად შეიცვალა და სიმეტრიული გახდა (სურ. 4).



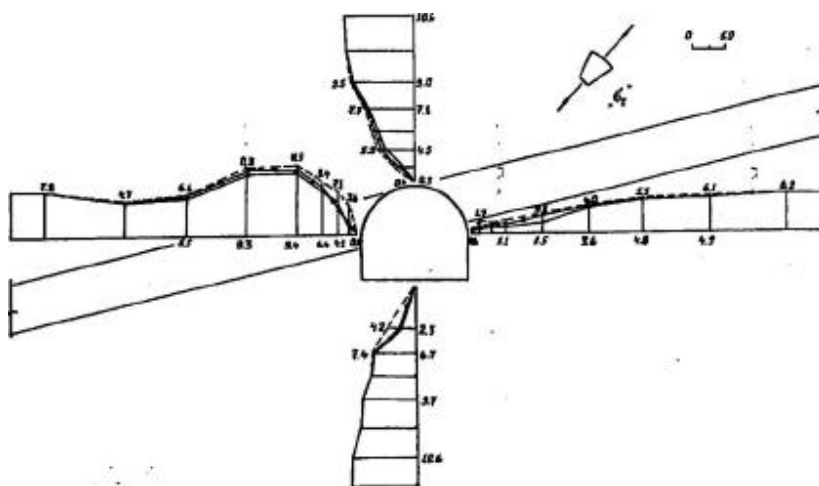
სურ. 4. რღვევის საერთო სურათი მასივში გვირაბის სრული კვეთით გაყვანისას.

გამოსაკვლევ სისტემის არაწრფივი მუშაობა მნიშვნელოვნად აისახა მასივში ძაბვების განაწილების ეპიურებზე. სამაგრის მიმდებარე ზონებში, სადაც ადგილი ჰქონდა რღვევას, აღინიშნა ძაბვების შემცირება განტვირთვა და მასივის სიღრმისეული ზონების დატვირთვა. აღნიშნული შესაბამისად აი-

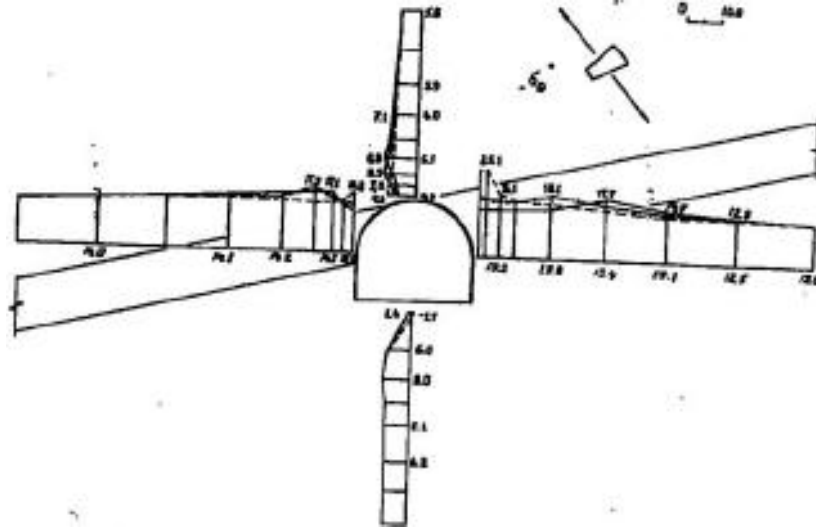
სახა  $\sigma_r$ ,  $\sigma_\theta$  და  $\tau_{r,\theta}$  ძაბვების განაწილების ეპიურებზე (სურ. 5,6,7.), სადაც რღვევის ზონების გავრცელების საზღვრები აღინიშნა ძაბვების გარდატეხით.

გვირაბის კონტურთან, სადაც  $\sigma_\theta$  ძაბვები წრფივი გაანგარიშების დროს აღწევდნენ მაქსიმალურ მნიშვნელობებს, არაწრფივი გაანგარიშებების დროს ძაბვები მცირდება, რაც აღინიშნა გვირაბის მარცხნივ საშუალოდ 1.4-ჯერ ( $\sigma_\theta = 12.1$  მგპა), მარჯვნივ ( $\sigma_\theta = 13.1$  მგპა) და ჭერთან 1.6-ჯერ ( $\sigma_\theta = 4.9$  მგპა) (სურ. 6).

გვირაბის კონტურიდან მასივის სიღრმისაკენ აღნიშნული ძაბვები იზრდება რღვევის გავრცელების საზღვრებამდე, სადაც ისინი აღწევენ მაქსიმალურ მნიშვნელობებს და შეადგინეს: გვირაბის მარცხნივ 17.1 მგპა, მის მარჯვნივ 17.7 მგპა და ჭერთან 8.8 მგპა. აღნიშნული ზონებიდან მასივის სიღრმისაკენ ისინი მცირდება წრფივი გაანგარიშების შესაბამის მნიშვნელობებამდე.



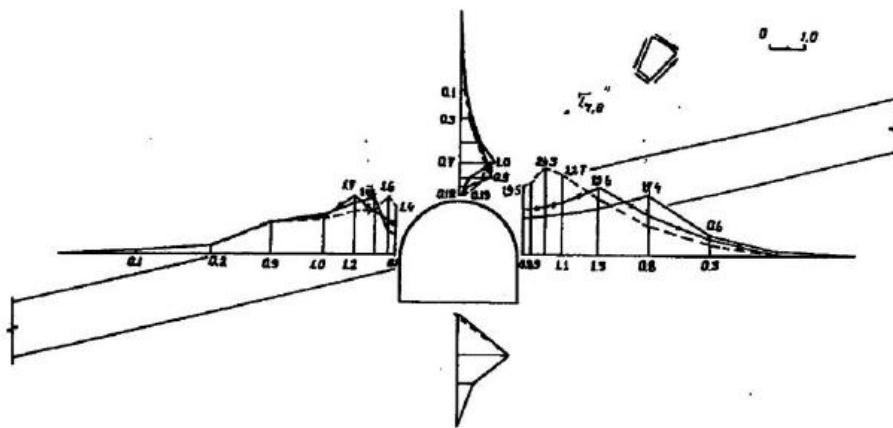
სურ. 5. „ $\sigma_r$ “ ძაბვების ეპიურები.



სურ. 6. „ $\sigma_r$ “ ძაბვების ეპიურები.

$\sigma_r$  რადიალური ძაბვები შემცირდა კვეთების გასწვრივ როგორც ჰორიზონტალური, ისე ვერტიკალური მიმართულებით (სურ. 5). მასივიდან გვირბისკენ წრფივი გაანგარიშების შედეგებთან შედარებით რადიალური ძაბვები თანდათან იკლებს და

რღვევის გავრცელების საზღვრებთან გვირბის მარცხნივ შემცირდა საშუალოდ 3.3-ჯერ ( $\sigma_r=1.1$  მგპა), მარჯვნივ 23-ჯერ ( $\sigma_r=1.5$  მგპა) და ჭერთან 1.5-ჯერ ( $\sigma_r=2.6$  მგპა).



სურ. 7. მხები ძაბვების –  $\tau_{r,\theta}$  ეპიურები.

რღვევის პროცესების განვითარების კვალობაზე, მასივში დამაბული მდგომარეობის ფორმირების შესაბამისად, ადგილი ჰქონდა სამაგრის კონსტრუქციაზე მოქმედი დატვირთვების გადანაწილებას.

სამაგრის კონსტრუქციაზე მოსული დატვირთვები ძირითადად სიმეტრიულ ხასიათს ატარებს (სურ. 8) თალის ძირითად ნაწილზე დატვირთვები შედარებით მცირეა, ისინი მნიშვნელოვნად იზრდე-

ბა დათმობის კვანძებთან და აღწევენ მაქსიმალურ მნიშვნელობებს. სამაგრზე დატვირთვების გადანაწილების ხასიათი, რომელიც მიღებულია წრფივი გაანგარიშებისას, შენარჩუნებულია არაწრფივი გაანგარიშების დროსაც. დატვირთვების საშუალო მნიშვნელობამ თაღის ცენტრალურ ნაწილში წრფივი გაანგარიშებისას შეადგინა 0.36 მგპა, რომელიც 4.5-ჯერ იზრდება დათმობის კვანძებთან და თაღის მარცხნივ და მარჯვნივ აღწევს 1.59 მგპა და 1.71 მგპა შესაბამისად. არაწრფივი გაანგარიშებისას თაღის ცენტრალურ ნაწილში დატვირთვები თითქმის 2-ჯერ მცირდება წრფივ გაანგარიშებასთან შედარებით და მისი საშუალო მნიშვნელობა აღწევს 0.18 მგპა-ს. რაც შეეხება დათმობის კვანძებთან, არაწრფივი გაანგარიშების დროს თაღზე მოსულ დატვირთვებს ისინი საშუალოდ 8-ჯერ გაიზარდა და სამაგრის მარცხენა და მარჯვენა კვანძებთან მიაღწია 1.35 მგპა და 1.51 მგპა შესაბამისად, რაც საშუალოდ 1.15-ჯერ ნაკლებია დატვირთვის მნიშვნელობებზე აღნიშნულ კვეთებზე წრფივ გაანგარიშებებთან შედარებით.

დატვირთვები სამაგრის ვერტიკალურ კედლებზე მცირდება დათმობის კვანძებიდან ძირებამდე. არაწრფივი გაანგარიშების დროს დატვირთვები წრფივთან შედარებით 1.1-ჯერ შემცირდა.

ამრიგად, როგორც სამაგრზე მოქმედი დატვირთვების ეპიურებიდან ჩანს, არაწრფივი გაანგარიშებისას სამაგრზე მოქმედი დატვირთვები წრფივთან შედარებით მცირდება – თაღოვან ნაწილში საშუალოდ 12-ჯერ და შეადგენს 32%-ს, ხოლო კედლებზე – 1.1-ჯერ და შეადგენს 13%-ს.

სამაგრის კონსტრუქციის დაძაბული მდგომარეობის ანალიზი გვიჩვენებს, რომ  $\sigma_{\theta}$  ტანგენციური

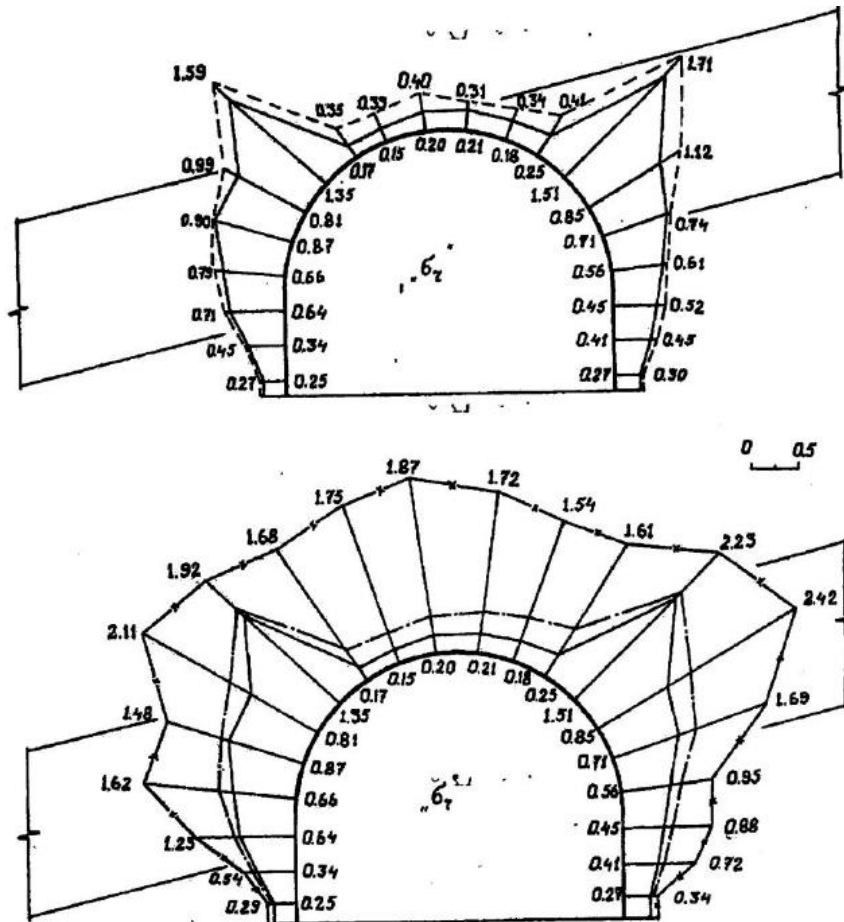
ძაბვები შედარებით მცირე სიდიდისაა დათმობის კვანძებს შორის არსებულ თაღში. აღნიშნული ძაბვები ინტენსიურად მატულობს თაღიდან სამაგრის კედლებისაკენ მათი ფუძეების მიმართულებით (სურ. 9) ძაბვების განაწილების აღნიშნული ხასიათი შენარჩუნებულია როგორც წრფივი, ისე არაწრფივი გაანგარიშებების დროს. არაწრფივი გაანგარიშების შედეგების მიხედვით მიღებულ იქნა, რომ სამაგრის მთელ კონსტრუქციაში, წრფივ გაანგარიშებასთან შედარებით ძაბვები იკლებს, რაც თაღის ზონაში აღინიშნა საშუალოდ 1.6-ჯერ, ხოლო სამაგრის კედლებში – 1.2-ჯერ. როგორც აღნიშნული ძაბვების ეპიურიდან ჩანს, მიუხედავად სამაგრის კონსტრუქციაში ძაბვების განაწილების გარკვეული სიმეტრიულობისა, ადგილი აქვს მის უთანაბრობას. კერძოდ, თაღის მარჯვენა ნაწილი საშუალოდ 12-ჯერ მეტად დაძაბული აღმოჩნდა მის მარცხენა ნაწილთან შედარებით.

სამაგრში,  $\sigma_{\theta}$  ძაბვების განაწილების ასეთი უთანაბრობა მასივის არაერთგვაროვნების გავლენაზე მიუთითებს. დათმობის კვანძებში ხდება ძაბვების უმნიშვნელო ვარდნა თაღის კვეთებთან შედარებით.

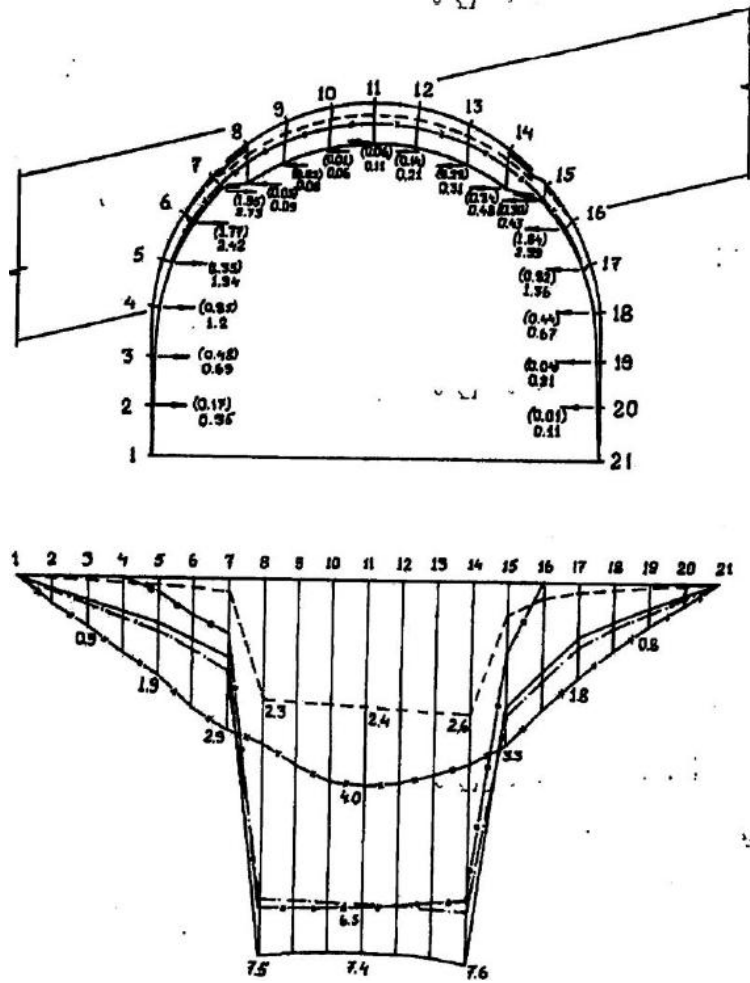
ტანგენციური ძაბვების ანალოგიურად არაწრფივი გაანგარიშებისას სამაგრის მთელ კონსტრუქციაში  $\tau_{r,\theta}$  მხები ძაბვები იკლებს. წრფივ გაანგარიშებასთან შედარებით სამაგრის კონსტრუქციაში მხები ძაბვები საშუალოდ 1.7-ჯერ შემცირდა. ქანების მასივსა და ქვანახშირის შრის საკონტაქტო ზედაპირზე ძაბვების გარდატეხა გამოვლინდა ეპიურზე. სამაგრის თაღსა და კედლებზე  $\sigma_{\theta}$  ტანგენციური ძაბვების გადანაწილების ზემოთ წარმოდგენილი კანონზომიერება შენარჩუნდა მხები ძაბვების გადანაწილების დროსაც. კერძოდ, დათმობის კვან-

მეხს შორის არსებული თაღის მარჯვენა ნაწილი  
საშუალოდ 1.75-ჯერ მეტად დაძაბული აღმოჩნდა  
მარცხენა ნაწილთან შედარებით, ხოლო სამაგრის  
მარცხენა კედელი საშუალოდ 1.35-ჯერ მეტად და-

ძაბული მარჯვენა კედელთან შედარებით მხები  
ძაბვების მაქსიმალური მნიშვნელობა დაფიქსირდა  
მარცხენა კედლის ფუძეში და შეადგინა 3.62 მგპა.



სურ. 8. დატვირთვის ეპიურები სამაგრის კონსტრუქციაზე: ა) წრფივი და არაწრფივი გაანგარიშებისას;  
ბ) არაწრფივი გაანგარიშებების შედეგები დათმობის კვანძების სხვადასხვა დათმობის მნიშვნელობის დროს.



სურ. 9. გვირგვინის კონსტრუქციის დეფორმაციების და გადაადგილებების გრაფიკები:

- ა) გვირგვინის სამაგროს დეფორმაციის სურათი,
- ბ) გვირგვინის სამაგროს ვერტიკალური გადაადგილებების გრაფიკი.

რღვევის პროცესების ფორმირება მნიშვნელოვნად აისახა აგრეთვე სამაგროს კონსტრუქციის დეფორმაციაზე. არაწრფივი გაანგარიშების შედეგად გაიზარდა როგორც თაღის ვერტიკალური, ისე კედლების ჰორიზონტალური გადაადგილებანი (სურ. 9). განსაკუთრებით ეს ითქმის დათმობის კვანძებს შორის არსებულ თაღზე, რომლის ვერტიკალურმა გადაადგილებამ კვეთში 7,4 სმ შეადგინა. თაღის ვერტიკალური გადაადგილებების ზრდა ძირითადად დათმობის კვანძების მუშაობითაა განპირობებული, რო-

მელთა დათმობის სიდიდემ მარცხენა და მარჯვენა კვანძებში 4.5 და 4.0 სმ შეადგინა შესაბამისად. სამაგროს კედლების ჰორიზონტალური მიმართულებით გადაადგილებების ნაზრდმა კონსტრუქციის მარცხენა და მარჯვენა ნაწილში დათმობის კვანძებთან შეადგინა 0.7 სმ და 0.12 სმ, რის შედეგადაც მათმა მაქსიმალურმა გადაადგილებებმა აღნიშნულ კვეთებში მიაღწია 273 სმ და 0.48 სმ შესაბამისად (სურ. 9.)

### დასკვნა

ამრიგად, როგორც არაწრფივი გაანგარიშების შედეგად იქნა მიღებული „სამაგრი–გარემომცველი მასივის“ სისტემის დამაბულ-დეფორმირებული მდგომარეობის ჩამოყალიბებაში მნიშვნელოვანია დათმობის კვანძების გავლენა, რომლებიც გვირახის ეტაპებად გაყვანის დროს სამაგრზე დატვირთვების ზრდის კვალობაზე თაღს აძლევს დამოუკიდებლად

გადაადგილებების საშუალებას. რღვევის პროცესების განვითარებას თან ახლავს სამაგრის კონსტრუქციის გადაადგილებების ზრდა, მასზე მასივიდან გადმოცემული დატვირთვების კლება და, შესაბამისად, კონსტრუქციის განტვირთვა. მცირდება დატვირთვები სამაგრის მიმდებარე რღვევის ზონებში, ხოლო იზრდება რღვევის ზონების ზომები მასივის შიგა არეებში.

---

### ლიტერატურა

1. Amusin, B. Z., & Fadeev, A. B. (1975). *Metod konechnykh elementov pri reshenii zadach gornoj geometrii*. Nedra.

UDC 624.191

SCOPUS CODE 2215

<https://doi.org/10.36073/1512-0996-2026-2-153-163>

## Joint Behavior of Support and Surrounding Rock Mass During Staged Tunnel Excavation Considering Nonlinear Interaction of Support and Rock

**Lavrenti Gudavadze** Georgian Technical University Faculty of mining, geology and sustainable mountain development, professor, Georgia  
E-mail: z.gudavadze@gtu.ge

### Reviewers:

**I. Gujabidze**, Georgian technical university, faculty of mining, geology and sustainable mountain development, professor

E-mail: I.k.gujabidze@gmail.com

**Z. Lebanidze**, Georgian technical university, faculty of mining, geology and sustainable mountain development, associate professor

E-mail: z.lebanidze@gtu.ge

**Abstract.** The article examines the joint behavior of the “support–surrounding rock mass” system during staged excavation of large-section tunnels, considering the nonlinear interaction between the support and the rock. The main objective of the study was to assess the effect of staged tunnel excavation compared to the full-face excavation scheme and to evaluate the influence of physical, geometrical, and loading nonlinearities of the system. The analyses were performed using the finite element method with a two-cycle (outer and inner cycles) scheme. The conditions for the formation of tensile and shear fractures, stress distribution, and the development of failure zones in the rock mass were evaluated. The results indicate that nonlinear analysis significantly alters the stress–strain state, reduces the loads acting on the support in the arch region, and leads to the propagation of failure zones into the mass. The study also revealed the significant impact of yielding joints on the structure’s displacements and load redistribution.

**Keywords:** Failure zone; Finite element method; Nonlinear analysis; Rock mass; Staged excavation; Stress–strain state; Support; Tunnel; Yielding joint.

---

*განხილვის თარიღი 05.02.2026*

*შემოსვლის თარიღი 12.02.2026*

*ხელმოწერილია დასაბეჭდად 26.06.2026*