

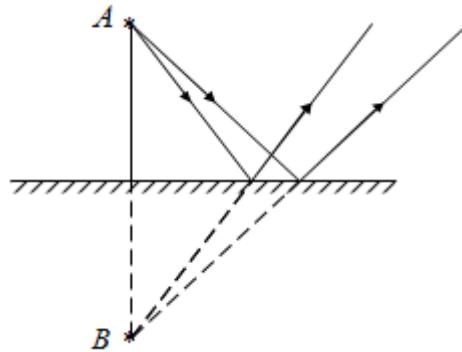
## ავთანდილ შურღაია

### ფიზიკა ამოცანებში

#### ოპტიკა - გაგრძელება

სინათლის არეკვლისა და გარდატეხის კანონების გამოყენებით შესაძლებელია საგნის გამოსახულების სარკეებსა და ლინზებში აგება.

ჩვენ ვამბობთ, რომ საგნის (ანუ სინათლის წყაროს) გამოსახულება ბრტყელ ან სფერულ სარკეში არის ნამდვილი, თუ ის მიიღება არეკლილი სხივების გადაკვეთის წერტილში და არის წარმოსახვითი, თუ ის მიიღება არეკლილი სხივების გაგრძელებების გადაკვეთით. ამ პრინციპის თანახმად ბრტყელ სარკეში საგნის გამოსახულება ყოველთვის წარმოსახვითია - ნახ. 1.

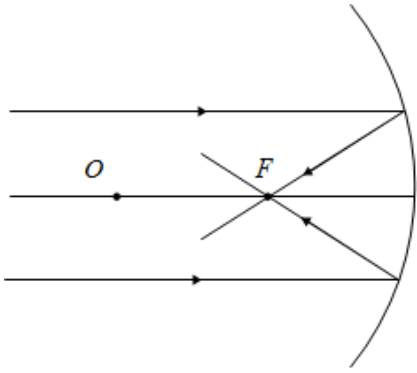


ნახ. 1 სინათლის წყარო  $A$  და გამოსახულება  $B$

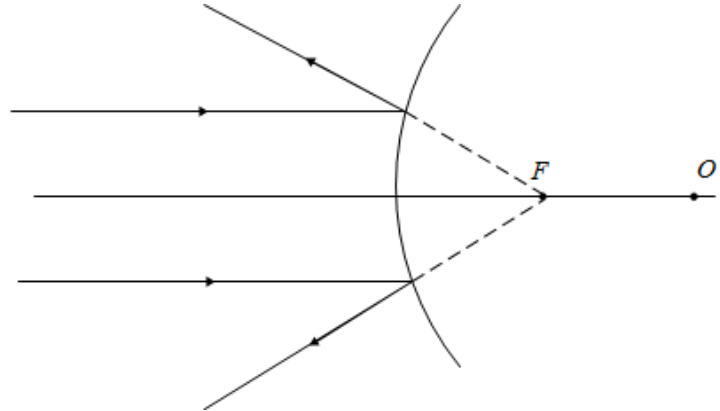
სფერული სარკის (ცალ მხარეს გაპრიალებული სფერული სეგმენტის) ოპტიკურ ცენტრზე (სფეროს გეომეტრიულ ცენტრზე) და სფეროს წვეროზე გამავალ წრფეს ეწოდება სარკის მთავარი ოპტიკური ღერძი, ხოლო სარკის ოპტიკურ ცენტრზე გამავალ ნებისმიერ სხვა ღერძს - ოპტიკური თანაღერძი. ჩაზნექილი სფერული სარკის მთავარი ოპტიკური ღერძის პარალელური

სინათლის

სხივები



ნახ. 2 ჩაზნექილი სფერული სარკე



ნახ. 3 ამოზნექილი სფერული სარკე

არეკვლის შემდეგ იკვეთებიან ერთ წერტილში (ნახ. 2), რომელსაც ეწოდება სარკის ნამდვილი ფოკუსი და ის მდებარეობს მთავარ ოპტიკურ ღერძზე სარკის რადიუსის შუა წერტილში. ამოზნექილ სარკეზე (ნახ. 2) დაცემული სხივები სარკიდან აირეკლებიან ისე, რომ არეკლილი სხივების გაგრძელებები გადაიკვეთებიან ერთ წერტილში და ამ წერტილს ეწოდება სარკის წარმოსახვითი ფოკუსი (ნახ. 3). მანძილს სარკის წვეროდან ფოკუსამდე ეწოდება ფოკუსური მანძილი. ჩაზნექილი სარკის ფოკუსური მანძილი არის დადებითი რიცხვი, ხოლო ამოზნექილი სარკის ფოკუსური მანძილი - უარყოფითი რიცხვი. აღვნიშნოთ მანძილი სარკიდან (წყაროდან) საგნამდე  $d$ , მანძილი სარკიდან გამოსახულებამდე  $f$ , ხოლო სარკის ფოკუსური მანძილი  $F$ . ამ სიდიდეებს შორის კავშირს ამყარებს ფორმულა, რომელსაც სარკის ფორმულა ეწოდება:

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{d} + \frac{1}{f}$$

აღსანიშნავია, რომ ამ ფორმულაში  $f > 0$ , თუ საგნის გამოსახულება სარკეში არის ნამდვილი და  $f < 0$ , თუ გამოსახულება არის წარმოსახვითი. ასევე  $d > 0$ , თუ საგანი არის ნამდვილი და  $d < 0$ , თუ საგანი არის წარმოსახვითი. შევნიშნოთ, რომ ამოზნექილი სარკეში  $f$  უარყოფითია (ეს ჩანს სარკის ფორმულიდანაც, რადგან ფოკუსური მანძილი უარყოფითი სიდიდეა), რაც იმაზე მიუთითებს, რომ გამოსახულება ყოველთვის წარმოსახვითია. ჩაზნექილ სარკეში გამოსახულება (ნამდვილი საგნის) შეიძლება იყოს ნამდვილიც (თუ  $d > F$ ) და წარმოსახვითიც (თუ  $d < F$ ). გარდა ამისა, საზოგადოდ სფერულ სარკეში გამოსახულების ზომები საგნის ზომებისგან განსხვავებულია. ამ მოვლენის რაოდენობრივი დახასიათება ხდება სიდიდით, რომელსაც ეწოდება სარკის გამადიდებლობა. თუ საგნის (სიმარტივისთვის ავიღოთ წრფივი საგანი) და გამოსახულების ზომებს აღვნიშნავთ შესაბამისად  $h$  და  $h'$ , მაშინ სარკის გამადიდებლობისთვის გვაქვს შემდეგი თანაფარდობა:

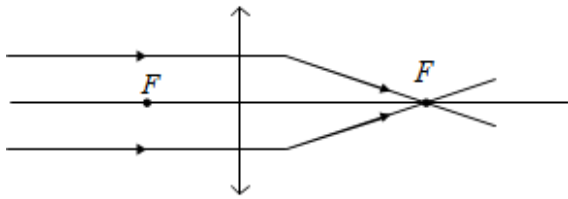
$$\Gamma \equiv \frac{h'}{h} = -\frac{f}{d}$$

ამ ფორმულაში პირობითად მიღებულია, რომ გამოსახულება არის შებრუნებული, თუ  $\Gamma < 0$  და პირიქით, არის პირდაპირი, თუ  $\Gamma > 0$ .

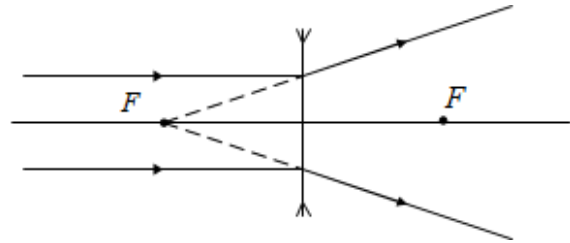
მოკლედ განვიხილოთ ლინზები. ლინზა არის ორი სფერული ზედაპირით შემოსაზღვრული გამჭვირვალე გარემო. არსებობს ორმხრივ ამოხნექილი ან ჩაზნექილი ლინზები, ჩაზნექილ-ამოხნექილი ლინზები, აგრეთვე ბრტყელ-ამოხნექილი და ბრტყელ-ჩაზნექილი ლინზები იმის მიხედვით, თუ როგორია ლინზის ნივთიერების შემოსაზღვრელი ზედაპირები. ჩვენ განვიხილავთ მხოლოდ თხელ ლინზებს, რომლის ზედაპირების წვეროებს შორის მანძილი ბევრად ნაკლებია მათ რადიუსებზე. ასეთი ლინზებისთვის

$$\frac{1}{F} = (n - 1) \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right),$$

სადაც  $R_1$  და  $R_2$  არის ლინზის ზედაპირების რადიუსები, ხოლო  $n$  არის ლინზის ნივთიერების გარდატეხის აბსოლუტური მაჩვენებელი. ლინზის მთავარი ოპტიკური ღერძი არის ლინზის ზედაპირების გეომეტრიულ ცენტრებზე გამავალი წრფე, ხოლო



ნახ. 4 ორმხრივ ამოხნექილი ლინზა



ნახ. 5 ორმხრივ ჩაზნექილი ლინზა

ლინზის ოპტიკურ ცენტრზე გამავალ ნებისმიერ წრფეს ეწოდება ლინზის ოპტიკური თანაღერძი. სხივი, რომელიც ვრცელდება ამ ღერძების გასწვრივ ლინზას გარდატეხის გარეშე გაივლის. ორმხრივ ამოხნექილი ლინზის მთავარი ოპტიკური ღერძის პარალელური სხივები ლინზაში გარდატეხის შემდეგ იკრიბებიან მთავარ ოპტიკურ ღერძზე ნამდვილ ფოკუსში, ხოლო ნებისმიერი ოპტიკური თანაღერძის პარალელური სხივები იკრიბებიან ამავე ღერძზე ერთ წერტილში. ასეთი წერტილების გეომეტრიული ადგილი ქმნის, ე.წ. ფოკალურ სიბრტყეს, რომელიც მართობულია მთავარი ოპტიკური ღერძის და გადის ფოკუსში. ასეთ ლინზას ეწოდება შემკრები ლინზა. ორმხრივ ჩაზნექილი ლინზის მთავარი ოპტიკური ღერძის პარალელური სხივები ლინზაში გარდატეხებიან ისე, რომ მათი გაგრძელებები იკვეთება მთავარ ოპტიკურ ღერძზე წარმოსახვით ფოკუსში. ოპტიკური თანაღერძის პარალელური სხივები ამ შემთხვევაში იკვეთებიან ფოკალურ სიბრტყეში<sup>1</sup>. ასეთ ლინზას ეწოდება გამშენვი ლინზა. ლინზის ფორმულას აქვს სარკის ფორმულის ანალოგიური სახე:

<sup>1</sup>შევნიშნოთ, რომ ეს სამართლიანია მხოლოდ იმ სხივებისთვის, რომლებიც ლინზას ან სარკეს ეცემიან ოპტიკური ღერძის/თანაღერძის მახლობლობაში. ღერძისგან მოშორებით გარდატეხის/არეკვლის შემ-

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{d} + \frac{1}{f}$$

ორმხრივ ამოზნექილი ლინზის ფოკუსური მანძილი  $F > 0$ , ხოლო ორმხრივ ჩაზნექილი ლინზისთვის  $F < 0$ , ხოლო  $d$  და  $f$  სიდიდეების ნიშნები განისაზღვრება ისევე, როგორც სარკეებისთვის. სიდიდეს

$$D = \frac{1}{F}$$

ეწოდება ლინზის ოპტიკური ძალა. მის ერთეულს ეწოდება დიოპტრი.

**ჩაზნექილი სარკე:** საგანი მოთავსებულია ჩაზნექილი სარკის ფოკუსს გარეთ ფოკუსიდან  $a = 0.24$  სმ მანძილზე, გამოსახულება იმყოფება ფოკუსიდან  $b = 0.54$  სმ მანძილზე. იპოვეთ სარკის გამადიდებლობა. როგორი გამოსახულება მიიღება?

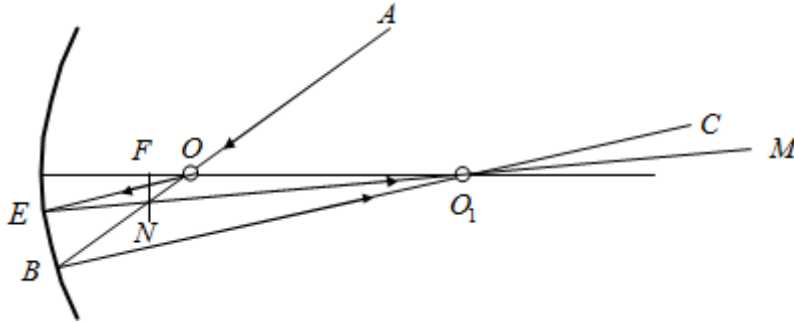
სარკის გამადიდებლობის საპოვნელად გვჭირდება მანძილები  $d$  და  $f$ . რადგან საგანი მოთავსებული ფოკუსს გარეთ  $a = d - F$  და  $f - F$ . ამ ორ განტოლებასთან ერთად ლინზის ფორმულა გვაძლევს სამუცნობიან განტოლებათა ჩაკეტილ სისტემას, რომლის ამოხსნებია  $d = a \pm \sqrt{ab}$  და  $f = b \pm \sqrt{ab}$ . რადგან საგანიც და გამოსახულებაც ნამდვილია (საგანი ფოკუსს გარეთ არის) ამოხსნა მინუს ნიშნით არაფიზიკურია. მართლაც, დაუშვათ  $f < 0$ . მინუსის შემთხვევაში  $b - \sqrt{ab} < 0$ , რაც ეკვივალენტურია ტოლობის  $b(b - a) < 0$ . რადგან  $b$  არის დადებითი სიდიდე,  $b - a < 0$ , რაც ამოცანის პირობას ეწინააღმდეგება. ამის გათვალისწინებით გამადიდებლობისთვის მიიღება:

$$\Gamma = -\frac{f}{d} = -\sqrt{\frac{b}{a}} = -1.5.$$

მაშასადამე, საგნის გამოსახულება არის ნამდვილი, შებრუნებული და 1.5-ჯერ გადიდებული.

**ჩაზნექილი სარკის ფოკუსი:** ჩაზნექილ სარკეს ეცემა  $AB$  სხივი, რომელიც მთავარ ოპტიკურ ღერძს კვეთს  $O$  წერტილში. სარკიდან არეკლილი  $BC$  სხივი იმავე ღერძს კვეთს  $O_1$  წერტილში. აგებით იპოვეთ სარკის ფოკუსი (ნახ. 6).

$O$  წერტილი შეიძლება ჩავთვალოთ სინათლის წყაროდ, ხოლო  $O_1$  მის გამოსახულებად. მაშინ  $O$  წერტილზე გამავალი  $BC$  სხივის პარალელური სხივი არეკვლის შემდეგ აუცილებლად გაივლის  $O_1$  წერტილზე. გავავლოთ  $O$  წერტილიდან  $OE$  სხივი. არეკლილი სხივი  $EM$  დაცემულ  $AB$  სხივს კვეთს  $N$  წერტილში, რომელიც მდებარეობს



ნახ. 6

ფოკალურ სიბრტყეზე. ამ წერტილიდან დაუშვათ მართობი მთავარ ოპტიკურ ღერძზე. გადაკვეთის წერტილი იქნება სარკის ფოკუსი.

**ლინზის ფოკუსური მანძილი:** მინისგან (გარდატეხის მაჩვენებელი  $n = 1.6$ ) დამზადებული ორმხრივ ამოზნექილი ლინზის ფოკუსური მანძილი  $F = 10$  სმ. იპოვეთ ლინზის ფოკუსური მანძილი, თუ მას მოვათავსებთ  $n_1 = 1.5$  გარდატეხის მაჩვენებლის მქონე გამჭვირვალე გარემოში. რის ტოლი იქნება ფოკუსური მანძილი, თუ  $n_2 = 1.7$ ?

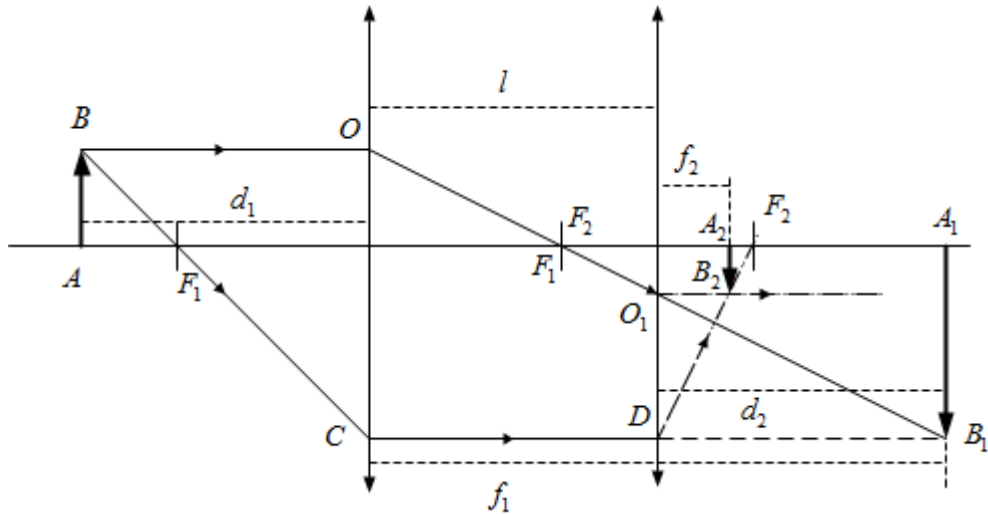
ლინზის ფოკუსური მანძილი ჰაერში გამოითვლება ფორმულით  $\frac{1}{F} = (n - 1) \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)$ . თუ მას მოვათავსებთ გარემოში  $n_1$  გარდატეხის მაჩვენებლით, მაშინ  $\frac{1}{F} = \left( \frac{n}{n_1} - 1 \right) \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)$ . ამ ორი განტოლებიდან მივიღებთ

$$F_1 = \frac{n_1(n-1)}{n-n_1} F = 90 \text{ სმ} > 0$$

და ლინზა იქნება შემკრები. მეორე შემთხვევისთვის ( $n_1 \rightarrow n_2 = 1.7$ ) მივიღებთ  $F_1 = -102 \text{ სმ} < 0$  და, ე.ი. ლინზა იქნება გამბნევი.

**ორი შემკრები ლინზა:** ოპტიკური სისტემა შედგება ორი შემკრები ლინზისგან, რომელთა ფოკუსური მანძილებია  $F_1 = 20$  სმ და  $F_2 = 10$  სმ. ლინზებს შორის მანძილი  $l = 30$  სმ. საგანი მოთავსებული პირველი ლინზისგან  $d_1 = 30$  სმ მანძილზე. მეორე ლინზისგან რა მანძილზე იქნება მოთავსებული საგნის გამოსახულება და როგორი იქნება ის?

პირველ რიგში ავაგოთ ნახაზი. ავაგოთ  $AB$  საგნის გამოსახულება პირველ ლინზაში (ჩავთვალოთ, რომ მეორე ლინზა არ გვაქვს). საგნის გამოსახულება იქნება  $A_1B_1$ . ნახაზზე ეს გამოსახულება აგებულია  $B$  წერტილიდან გამომავალი ორი სხივით: ერთი პირველი ლინზის ფოკუსზე გამავალი, ხოლო მეორე მთავარი ოპტიკური ღერძის პარალელურად. გავითვალისწინოთ მეორე ლინზა.



ნახ. 7

$B$  წერტილიდან გამომავალი სხივები მეორე ლინზას ხვდებიან შესაბამისად  $D$  და  $O_1$  წერტილებში.  $D$  წერტილიდან სხივი გაივლის მეორე ლინზის ფოკუსში, როგორც მთავარი ოპტიკური ღერძის პარალელური სხივი. ამოცანის პირობის თანახმად ლინზების ფოკუსები (ლინზებს შორის) ერთმანეთს ემთხვევა. ამიტომ მეორე ლინზის  $O_1$  წერტილიდან სხივი გარდატყდება მთავარი ოპტიკური ღერძის პარალელურად. ამ ორი სხივის გადაკვეთის წერტილი მოგვცემს  $B$  წერტილის  $B_2$  გამოსახულებას და საგნის გამოსახულება იქნება  $A_2B_2$ . როგორც ნახაზიდან ჩანს გამოსახულება არის ნამდვილი, შებრუნებული და შემცირებული.

გამოვთვალოთ, თუ რა მანძილზე იქნება  $A_2B_2$  გამოსახულება მეორე ლინზიდან. გამოვიყენოთ ლინზის ფორმულა პირველი ლინზისთვის:

$$\frac{1}{d_1} + \frac{1}{f_1} = \frac{1}{F_1}$$

აქედან დავადგენთ, რომ გამოსახულება (თუ არ იქნებოდა მეორე ლინზა) უნდა ყოფილიყო  $f_1 = 60$  სმ მანძილზე პირველი ლინზიდან. მეორე ლინზისთვის ის წარმოადგენს წარმოსახვით საგანს. მართლაც ლინზებს შორის მანძილი განიმარტება როგორც  $l = d_2 + f_1$ . აქედან განისაზღვრება მანძილი  $d_2$  მეორე ლინზიდან საგნამდე (ანუ გამოსახულებამდე პირველ ლინზაში, რომ არ ყოფილიყო მეორე ლინზა), რომელიც შეიძლება იყოს როგორც დადებითი, ასე უარყოფითი. მეორე ლინზისთვის ლინზის ფორმულაში უნდა ჩავსვათ  $d_2 = l - f_1$ . თუ ჩავსვათ რიცხვებს, მივიღებთ  $d_2 = -30$  სმ. ეს ნიშნავს, რომ საგანი მეორე ლინზაში არის წარმოსახვითი. ამიტომ

$$\frac{1}{d_2} + \frac{1}{f_2} = \frac{1}{F_2'} \Rightarrow \frac{1}{l - f_1} + \frac{1}{f_2} = \frac{1}{F_2}$$

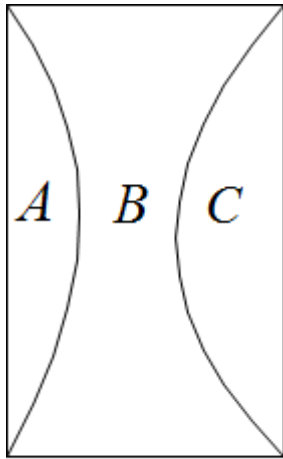
აქედან მივიღებთ  $f_2 = 7.5$  სმ.

ლინზათა სისტემის გამადიდებლობა ტოლია თითოეული ლინზის გამადიდებლობის ნამრავლის

$$\Gamma = \Gamma_1 \Gamma_2, \Gamma_1 = -\frac{f_1}{d_1}, \Gamma_2 = -\frac{f_2}{d_2}, \Rightarrow \Gamma = -0.5.$$

ამრიგად მიიღება საგნის ნამდვილი, შებრუნებული ( $\Gamma < 0$ ) და ორჯერ შემცირებული გამოსახულება.

**სამი ლინზა:** ორი ბრტყელ-ამოზნეკილი და ერთი ორმხრივ ჩაზნეკილი ქმნის სისტემას ისე, რომ ლინზები ერთმანეთში მჭიდროდ არის ჩადგმული (იხ. ნახ. 8). *A* და *B* ლინზების ოპტიკური ძალა ცალკე აღებული ტოლია -3-ის, ხოლო *B* და *C* ლინზების ოპტიკური ძალა - 2-ის. იპოვეთ თითოეული ლინზის ოპტიკური ძალა.



ნახ. 8

ორი ლინზის სისტემის ოპტიკური ძალა ტოლია თითოეული ლინზის ოპტიკური ძალები ჯამის. პირობის თანახმად

$$D_A + D_B = -3, \quad D_B + D_C = -2.$$

ეს სამი ლინზა პირობის თანახმად ქმნის მართკუთხა პარალელეპიპედს, რომლის ოპტიკური ძალა ნულის ტოლია:  $D_A + D_B + D_C = 0$ . მივიღეთ სამუცნობიან განტოლებათა სისტემა, რომელიც მარტივად იხსნება:  $D_A = 2, D_B = -5, D_C = 3$ .