

IPHO 2026 — ნაკრების შესარჩევი

საქართველოს განათლებისა და მეცნიერების სამინისტრო

ექსპერიმენტული ტური

მონაცემების დამუშავების ტური გრძელდება **3 საათი და 30 წუთი**. ამოცანა ფასდება მაქსიმუმ **15 ქულით**.

ტურის მსვლელობისას

გეძლევათ სამუშაო ფურცლები, სადაც დანვრილებით უნდა აღწეროთ შესრულებული სამუშაო. თუ ფურცელზე ისეთი რამ დაწერეთ, რაც არ გინდათ რომ შეფასდეს, გადახაზეთ ჩანაწერი. გამოიყენეთ ყოველი ფურცლის მხოლოდ წინა მხარე.

შეცადეთ გააკეთოთ რაც შეიძლება მოკლე ჩანაწერები: გამოიყენეთ განტოლებები, ლოგიკური ოპერატორები და ნახატები (ნახაზები) თქვენი ჩანაწერის საილუსტრაციოდ. ერიდეთ გრძელი წინადადებების გამოყენებას. ცდომილებების გამოთვლა არაა საჭირო, თუკი ეს საგანგებოდ არ არის მოთხოვნილი. სამაგიეროდ გევალებათ ციფრების სწორი სიზუსტით მითითება, როდესაც რაიმე რიცხვს დააფიქსირებთ. გრაფიკების აგებისას ეცადეთ დანაყოფებიანი ქალაქი გამოიყენოთ მაქსიმალურად. გრაფიკზე მიუთითეთ გადაზომილი სიდიდეები და შესაბამისი ერთეულები. საუკეთესო წრფე გავლეთ თვალზომით (სახაზავის გამოყენებით).

ამოცანა: თერმოელექტრული მოვლენები პელტიეს ელემენტში (15 ქულა)

შესავალი

თანამედროვე ტექნოლოგიებში თერმოელექტრული მოვლენები ფართოდ გამოიყენება როგორც მყარსხეულოვანი გაგრილებისათვის, ასევე სითბოსგან ელექტროენერჯის მისაღებად. პელტიეს ელემენტი წარმოადგენს ნახევარგამტარულ მონოკობილობას, რომელიც ორივე ფუნქციას ითავსებს. ამ ექსპერიმენტში თქვენ შეისწავლით პელტიეს ელემენტში მიმდინარე თერმოდინამიკურ და ელექტრულ პროცესებს და განსაზღვრავთ მის ფუნდამენტურ მახასიათებლებს.

ექსპერიმენტის განმავლობაში შეგხვდებათ ტემპერატურის აღმნიშვნელი შემდეგი ცვლადები: T_h — ცხელი ფირფიტის ტემპერატურა, ხოლო T_c — ცივი ფირფიტის ტემპერატურა. ტემპერატურათა სხვაობა აღინიშნება $\Delta T = T_h - T_c$.

ხელსაწყოების სია

- პელტიეს ელემენტი
- კვების წყარო (5V, 3A DC)
- მულტიმეტრი — 2 ცალი (ტოლსენის მულტიმეტრი გამოიყენეთ ვოლტმეტრად)
- 2-არხიანი ციფრული თერმომეტრი (2 თერმო-ზონდით, K ტიპი)
- კვადრატული წებოვანი თბოიზოლაციის ბლოკები
- წინააღმდეგობების ნაკრები: 2.2 Ω (2 ცალი), 4.7 Ω , 10 Ω . წინააღმდეგობის მნიშვნელობა და სიმძლავრე მითითებულია თითოეულ წინააღმდეგობაზე.
- დამაკავშირებელი სადენები, ნიანგისებრი მომჭერები, ელასტიური სტიკერები

⚠ მნიშვნელოვანი უსაფრთხოების წესები

- მუდმივად აკონტროლეთ პელტიეს ცხელი ფირფიტის ტემპერატურა (T_h). **არ დაუშვათ, რომ T_h -მა გადააჭარბოს 80°C-ს!** თუ ტემპერატურა ამ ზღვარს მიუახლოვდა, დაუყოვნებლივ გამორთეთ კვების წყარო.
- არ ჩართოთ პელტიეს ელემენტი კვების წყაროში გარე წინააღმდეგობის გარეშე.** ყოველთვის გამოიყენეთ მინიმუმ ერთი გარე წინააღმდეგობა (2.2 Ω ან მეტი).

ხელსაწყოების გამოყენების ინსტრუქცია

1. ციფრული თერმომეტრი და ზონდები:

- თერმომეტრის ყუთიდან ამოიღეთ თეთრი დამჭერი და ამოიღეთ ორი სადენი (თერმო-ზონდი).

- ზონდების შეერთებისას აუცილებლად დაამთხვიეთ ზონდსა და თერმომეტრის კორპუსზე არსებული (+) და (-) ნიშნები. წინააღმდეგ შემთხვევაში სადენი ბუდეში არ შევა.
- დარწმუნდით, რომ თერმომეტრი ტემპერატურას აჩვენებს **ცელსიუსებში (°C)** და არა ფარენჰაიტებში.
- აუცილებელია, რომ თერმომეტრი დაყენებული იყოს **Type K** რეჟიმში. დააჭირეთ ლილაკს "Type" რათა ეკრანზე გამოჩნდეს "K".
- ეკრანის ლილაკებით შეგიძლიათ აირჩიოთ T1, T2 ან ΔT სხვადასხვა კომბინაციით. გამოიყენეთ თქვენთვის მოსახერხებელი რეჟიმი.

2. მულტიმეტრი:

- ომმეტრის რეჟიმი — წინააღმდეგობის გასაზომად.
- ამპერმეტრის რეჟიმი — დენის გასაზომად (მიმდევრობით შეერთება).
- ვოლტმეტრის რეჟიმი — ძაბვის გასაზომად (პარალელური შეერთება).
- აუცილებლად აირჩიეთ **მუდმივი დენის (DC)** რეჟიმი.
- **ყურადღება:** შუპებს ორივე ბოლოზე უკეთია პლასტმასის დამცავი. მოხსენით ეს საფარები, რათა გამოჩნდეს ლითონის ბოლოები. სწორედ ეს ბოლოები უნდა შეეხოს გასაზომ ზედაპირს.

3. თერმო-ზონდების დამაგრება:

- გამოიყენეთ ნეზოვანი ლენტის თერმომეტრის თავების გასაზომ ზედაპირზე დასამაგრებლად.
- თერმომეტრის თავები მიაკარით პელტიეს ელემენტის ორივე მხარეს. კვადრატული ფირფიტის ცენტრში.

4. კვების წყარო:

- კვების წყარო იძლევა 5 ვოლტს. შავი ბოლო არის უარყოფითი და წითელი დადებითი.
- არ დაამოკლოთ კვების ბლოკის დადებითი და უარყოფითი სადენები.

5. პელტიეს ელემენტი:

- წრედში ჩართვისას ელემენტის შავი ბოლო უნდა მიერთდეს უარყოფით, ხოლო წითელი დადებით პოლუსთან.
- ელემენტს აქვს **ცივი** და **ცხელი** მხარეები. იმისათვის რომ გაიგოთ რომელი მხარე თბება და რომელი ცივდება, შეგიძლიათ რამდენიმე წამით შეარეთოთ ელემენტი კვების წყაროში და თითქმის იგრძნობთ ზედაპირების ტემპერატურის ცვლილებას.

ნაწილი A: პარაზიტული წინააღმდეგობების, ზეებეკის კოეფიციენტისა (α) და შიგა წინააღმდეგობის (R_p) განსაზღვრა (10 ქულა)

პელტიეს ელემენტს გააჩნია საკმაოდ მცირე შიგა ელექტრული წინააღმდეგობა. შესაბამისად, წრედში ჩართული სხვა ელემენტების პარაზიტული წინააღმდეგობები არ არის უგულვებელყოფადი. სანამ პელტიეს ელემენტის შესწავლას დაიწყებთ, აუცილებელია გაზომოთ წრედის დამხმარე ნაწილების წინააღმდეგობები.

A.0 – 0.25 ქულა

ელემენტს აქვს მოდელის აღმნიშვნელი წარწერა ერთ მხარეს. ჩაინიშნეთ წარწერიანი მხარე არის ცივი თუ ცხელი.

A.1 – 0.5 ქულა

მულტიმეტრის ომმეტრის რეჟიმში ჩართვით (შავი სადენი – COM პორტში, წითელი – Ω პორტში), გაზომეთ ერთი ცალი ნიანგისებრი მომჭერის წინააღობა. ჩანერეთ გაზომილი მნიშვნელობა და მისი ცდომილება (ΔR).

A.2 – 0.25 ქულა

იგივე მეთოდით გაზომეთ უშუალოდ მულტიმეტრის სადენების (შუპების) წინააღობა და მისი ცდომილება (ΔR).

A.3 – 0.5 ქულა

ექსპერიმენტის მსვლელობისას დაგჭირდებათ მულტიმეტრის გამოყენება ამპერმეტრის რეჟიმში, მილიამპერების (mA) დიაპაზონებში (არ გამოიყენოთ 10A პორტი). თითოეულ დიაპაზონს გააჩნია თავისი შიგა წინააღობა. გაზომეთ ამპერმეტრის შიგა წინააღობა (R_A) თითოეული დიაპაზონისთვის მეორე მულტიმეტრის (როგორც ომმეტრის) გამოყენებით. ჩანერეთ თითოეული დიაპაზონის შესაბამისი შიგა წინააღობის მნიშვნელობა.

ყურადღება: მომდევნო ექსპერიმენტებში, ვოლტმეტრით ძაბვის გაზომვისას, აუცილებლად გაითვალისწინეთ პარაზიტულ წინააღობებზე (ამპერმეტრი, სადენები, მომჭერები) ძაბვის ვარდნა.

თეორიული საფუძველი

როდესაც პელტიეს ელემენტის ფირფიტებს შორის არსებობს ტემპერატურული სხვაობა ($\Delta T = T_h - T_c$), იგი გამოიმუშავებს ღია წრედის ძაბვას (ზეებეკის ეფექტი):

$$V_{open} = \alpha \Delta T \quad (1)$$

როდესაც ელემენტი ჩართულია კვების წყაროში, მასზე მოდებული ძაბვა (V_p) მოიცავს როგორც წინააღობაზე ძაბვის ვარდნას, ასევე ზებეკის უკუ-ემძ-ს:

$$V_p = IR_p + \alpha \Delta T \quad (2)$$

სადაც R_p არის პელტიეს ელემენტის შიგა ელექტრული წინააღმდეგობა, α არის ზეებეკის კოეფიციენტი, I არის დენის ძალა.

შენიშვნა: მე-2 ფორმულა ყოველთვის სამართლიანია, მაგრამ ტემპერატურის გაზომვის ინერციის გამო, ზუსტი გაზომვების ჩასატარებლად საჭიროა დაველოდოთ სტაბილიზაციას.

A.4 – 4 ქულა

მოამზადეთ შემდეგი სქემა: **10 W, 2.2 Ω** წინააღმდეგობა (გამაცხელებელი) მოათავსეთ თბოიზოლაციის ბუნიონში. თბოიზოლაციას შეგიძლიათ ააძროთ ლენტი რომ წინააღმდეგობა დააფიქსიროთ წებოვანი გვერდით (არ არის აუცილებელი). პელტიეს ელემენტის **ცხელი მხარე** მიამაგრეთ გამაცხელებელზე, ხოლო **ცივ მხარეს** დააღეთ წყლის პარკი (ოთახის ტემპერატურის წყლით).

ვოლტმეტრი მიაერთეთ პელტიეს ელემენტზე V_{open} -ის გასაზომად.

პასუხების ფურცელზე დახაზეთ ამ სქემის ნახაზი.

ა) ექსპერიმენტის ჩატარება და გაზომვები (1.0 ქულა)

1. კვების წყაროს ჩართვამდე დაელოდეთ თერმულ წონასწორობას — ორივე თერმომეტრი უნდა აჩვენებდეს ერთნაირ ტემპერატურას (T_p).
2. ჩართეთ კვების წყარო (5 V) გამაცხელებელ წინააღმდეგობაზე. ტემპერატურის სხვაობა ნელ-ნელა გაიზარდება.
3. **გაცხელების ფაზა:** ყოველ 0.2–0.3 °C ნაბიჯზე ერთდროულად ჩაიწერეთ ΔT და V_{open} . გააგრძელეთ სანამ ΔT არ მიაღწევს 5–6 °C-ს ან სტაბილიზდება. შეგიძლიათ გამოიყენოთ Hold ღილაკები ანათვლების დასაფიქსირებლად.
4. **გამორთეთ კვების წყარო.** ტემპერატურის სხვაობა ნელ-ნელა შემცირდება.
5. **გაცივების ფაზა:** ანალოგიურად ჩაიწერეთ ΔT და V_{open} , სანამ ΔT არ დაუბრუნდება საწყის მნიშვნელობას.

შეაგროვეთ სულ მცირე 25 მონაცემი (გაცხელება + გაცივება ჯამში).

გაითვალისწინეთ: თერმომეტრის სენსორებს გააჩნიათ სითბური ინერცია. ამის გამო, ერთსა და იმავე ΔT მნიშვნელობისთვის გაცხელებისა და გაცივების დროს V_{open} განსხვავდება. ამიტომ ანათვლებს ვიღებთ როგორც გათბობის ასევე გაცივების დროს.

ბ) გრაფიკი (1.5 ქულა)

- ააგეთ V_{open} -ის ΔT -ზე დამოკიდებულების **გრაფიკი**. გამორიცხული წერტილები გადახაზეთ X-ით.
- განსაზღვრეთ α გრაფიკის დახრილობიდან.
- საუკეთესო წრფე გააფლეთ თვალბოძით (სახაზბოძით).

გ) გამოთვლები (1.5 ქულა)

- თითოეული მონაცემისთვის გამოთვალეთ $\alpha_i = V_{open,i} / \Delta T_i$ და ჩაწერეთ ცხრილში.

- დაბალი ΔT -ს წერტილებისთვის ($\Delta T < 1^\circ\text{C}$) α_i შეიძლება იყოს არასანდო — ასეთ შემთხვევაში წერტილები მონიშნეთ, როგორც გამოსარიცხი.
- გამოთვალეთ α -ს საშუალო მნიშვნელობა და **სტანდარტული გადახრა** ინდივიდუალური α_i მნიშვნელობებიდან (გამორიცხული წერტილების გარეშე).

A.5 – 3 ქულა

ამ პუნქტში მე-2 ფორმულის გამოყენებით განვსაზღვრავთ შიდა წინალობას.

ა) ექსპერიმენტის აწყობა და გაზომვები (1.0 ქულა)

შეაერთეთ პელტიეს ელემენტი, კვების წყარო, გარე წინალობა და ამპერმეტრი მიმღევრობით. ვოლტმეტრი მიაერთეთ პარალელურად.

გაზომვები დაიწყეთ დიდი გარე წინალობით (ისე, რომ ΔT იყოს მცირე) და ნელ-ნელა შეამცირეთ გარე წინალობა. გამოიყენეთ **მინიმუმ 7** სხვადასხვა გარე წინალობის მნიშვნელობა. შეგიძლიათ გამოიყენოთ მოცემული წინალობები ინდივიდუალურად, მიმღევრობით ან პარალელურად შეერთებით.

თითოეული რეჟიმის დაყენებისას, აუცილებლად დაელოდეთ **გემპერაგურის სტაბილიზაციას**: გემპერაგურა არ უნდა იცვლებოდეს 0.1°C -ზე მეტით 30 წამის განმავლობაში.

პასუხების ფურცელზე დახაზეთ ის ელექტრული წრედი, რომელსაც იყენებთ ამ პუნქტში.

ჩაიწერეთ: T_h , T_c , ΔT , დენის ძალა I და ძაბვა V . A.1–A.3 პუნქტებში ნაპოვნი პარამეტრული წინალობების გათვალისწინებით, გამოთვალეთ ძაბვა უშუალოდ პელტიეს ელემენტზე (V_p) თითოეული გაზომვისთვის.

ბ) გრაფიკი (1.0 ქულა)

მე-2 ფორმულის ორივე მხარე გაყავით ΔT -ზე:

$$\frac{V_p}{\Delta T} = R_p \cdot \frac{I}{\Delta T} + \alpha$$

ააგეთ $y = V_p/\Delta T$ -ს $x = I/\Delta T$ -ზე დამოკიდებულების **წრფივი გრაფიკი**. საუკეთესო წრფე გაავლეთ სახაზარით.

გ) შედეგები და ანალიზი (1.0 ქულა)

- საუკეთესო წრფის დახრილობიდან განსაზღვრეთ **შიგა წინალობა** R_p .
- y -ღერძთან გადაკვეთის წერტილიდან განსაზღვრეთ **ზევებულის კოეფიციენტი** α .

შეადარეთ მიღებული α A.4 პუნქტში ნაპოვნი მნიშვნელობას.

A.6 – 1.5 ქულა

ნახევარგამტარულ მასალებში ელექტრული წინაღობა შესაძლოა დამოკიდებული იყოს ტემპერატურაზე. A.5 პუნქტში აღებული მონაცემებისა და A.4-ში ნაპოვნი α -ს გამოყენებით, გამოთვალეთ R_p თითოეული გაზომვისთვის ცალ-ცალკე:

$$R_p = \frac{V_p - \alpha \Delta T}{I}$$

ააგეთ R_p -ს T_h -ზე დამოკიდებულების გრაფიკი. გამოთვალეთ R_p -ს საშუალო მნიშვნელობა და სტანდარტული გადახრა (ან ცდომილება).

მიღებული გრაფიკის საფუძველზე გააკეთეთ კომენტარი: აქვს თუ არა R_p -ს შესამჩნევი დამოკიდებულება ტემპერატურაზე (T_h)?

ნაწილი B: თერმოელექტრული გენერატორი (5 ქულა)

პელტიეს ელემენტი არ არის მხოლოდ გამაგრილებელი. ზეებეკის ეფექტის წყალობით ტემპერატურათა სხვაობის არსებობისას ელემენტი შეიძლება გამოვიყენოთ როგორც თერმოელექტრული გენერატორი, რომელიც ელექტრულ ენერგიას გამოიმუშავებს.

თუ ტემპერატურის სხვაობის (ΔT) მქონე პელტიეს ელემენტს მივაერთებთ გარე დატვირთვის წინაღობას (R_L), ელემენტი იქცევა როგორც ძაბვის წყარო ემძ $\varepsilon = \alpha \Delta T$ და შიგა წინაღობა R_p :

$$I = \frac{\alpha \Delta T}{R_p + R_L} \quad (5)$$

$$V_L = I \cdot R_L = \alpha \Delta T - I \cdot R_p \quad (6)$$

სადაც V_L არის ძაბვა დატვირთვის წინაღობაზე, I — დენის ძალა წრედში.

დატვირთვაზე გაცემული სიმძლავრე:

$$P_L = V_L \cdot I = (\alpha \Delta T) \cdot I - I^2 R_p \quad (7)$$

თერმოელექტრული მასალის ეფექტიანობა ხასიათდება ხარისხის ფაქტორით (figure of merit):

$$ZT = \frac{\alpha^2 T}{R_p K}$$

სადაც $T = (T_h + T_c)/2$ არის მოდულის საშუალო ტემპერატურა. $K = 0.323 \text{ W/K}$ (ვატი/კელვინი) ელემენტის თბოგამტარობა. მაღალხარისხიანი Bi_2Te_3 მოდულებისთვის ოთახის ტემპერატურაზე $ZT \approx 0.7-1.0$.

B.1 – 0.5 ქულა

ნაწილი 1 (0.5 ქულა): მე-7 ფორმულის გამოყენებით დაამტკიცეთ, რომ P_L მაქსიმალურია, როდესაც $R_L = R_p$ და ამ შემთხვევაში:

$$P_{max} = \frac{(\alpha \Delta T)^2}{4R_p} \quad (8)$$

B.2 – 1.5 ქულა

ექსპერიმენტის მომზადება:

გამოიყენეთ A.4 ნაწილის მსგავსი სქემა: მოათავსეთ **10 W, 2.2 Ω** წინაღობა თბოსაიზოლაციო ზედაპირზე, პელტიეს ელემენტის **ცხელი მხარე** მიამგრეთ გამაცხელებელზე, **ცივ მხარეს** დაადეთ წყლის პარკი. თერმომეტრის ზონდები მიმაგრებული უნდა იყოს პელტიეს ელემენტის ორივე ფირფიტაზე.

ჩართეთ კვების წყარო (5 V) გამაცხელებელ წინაღობაზე და დაელოდეთ **ტემპერატურის სტაბილიზაციას**. სტაბილიზაციას სჭირდება **5–10 წუთი**. სისტემა სტაბილურია, როცა ΔT მთელი გაზომვის პროცესში არ იცვლება **0.3° C-ზე მეტით**.

რჩევა: სტაბილიზაციის ლოდინის დროს შეგიძლიათ იმუშაოთ A და B ნაწილების გრაფიკებსა და გამოთვლებზე.

ელექტრული წრედი და გაზომვები:

პასუხების ფურცელზე დახაზეთ ის **ელექტრული წრედი**, რომელსაც იყენებთ. წრედში შედის: პელტიეს ელემენტი (ემპ წყარო), შემაერთებული მავთულები (ჯამპერები) და დატვირთვის წინაღობა R_L ; ვოლტმეტრი R_L -ზე პარალელურად.

ყურადღება: ამ ექსპერიმენტში **ამპერმეტრი არ ჩართოთ** წრედში — მისი შიგა წინაღობა მნიშვნელოვნად შეამცირებს დენს და დაამახინჯებს შედეგებს. საჭიროების შემთხვევაში დენის ძალა გამოთვალეთ ვოლტმეტრის გამოყენებით.

მნიშვნელოვანი: თუ შემაერთებელ მავთულებს (ჯამპერებს) იყენებთ, მიუთითეთ ნახაზზე მათი წინაღობა R_w და ჩართვის ადგილი. ჯამპერის წინაღობა შედის წრედის სრულ წინაღობაში. ჯამპერები შეგიძლიათ გამოიყენოთ როგორც დაბალი წინაღობის ($< 1 \Omega$) დატვირთვაც.

თითოეული R_L -ისთვის ჩაიწერეთ:

- R_L — დატვირთვის წინაღობა (მომჭერებისა და ჯამპერების წინაღობის ჩათვლით)

- V_L — ძაბვა R_L -ზე (ვოლტმეტრით)
- ΔT — ტემპერატურათა სხვაობა (თერმომეტრით)

გაზომეთ **მინიმუმ 8 სხვადასხვა** დატვირთვის წინააღობისთვის, ინდივიდუალური წინააღობებისა და მათი კომბინაციების (მიმდევრობითი და პარალელური) გამოყენებით. მოიცავეთ **მცირე** ($< 2 \Omega$) და **დიდი** ($> 10 \Omega$) წინააღობები.

B.3 – 1.75 ქულა

თითოეული გაზომვისთვის გამოთვალეთ სიმძლავრე: $P_L = V_L^2/R_L$.

ააგეთ P_L -ს R_L -ზე დამოკიდებულების **გრაფიკი**.

1. **მაქსიმუმის პოვნა:** გრაფიკიდან იპოვეთ R_L მნიშვნელობა, რომელზეც P_L **მაქსიმალურია**.
მაქსიმუმის დასაზუსტებლად გამოიყენეთ ინტერპოლაცია ან პიკის მიმდებარე წერტილებზე პარაბოლის მორგება.
2. R_p -ს **გამოთვლა:** ოპტიმალური $R_{L,opt}$ -ის მნიშვნელობიდან გამოაკელით პარაზიტული წინააღობა და **გამოთვალეთ** R_p . შეადარეთ **A** და **B** ნაწილებში ნაპოვნ მნიშვნელობებს.

B.4 – 1.25 ქულა

1. იპოვეთ **გაზომილი მაქსიმალური სიმძლავრე** $P_{max,exp}$.
2. მე-8 ფორმულის გამოყენებით, გამოთვალეთ **თეორიული** $P_{max,th}$ ექსპერიმენტის ΔT -ისთვის, **A** ნაწილში ნაპოვნი α და R_p მნიშვნელობებით.
3. ექსპერიმენტის მონაცემების (α , R_p) გამოყენებით, გამოთვალეთ **ხარისხის ფაქტორი** ZT ($T^- \approx 300 \text{ K}$) და ΔT_{max} გაგრილების რეჟიმში ($T_c \approx 300 \text{ K}$).
4. კომენტარი: შეადარეთ ZT მაღალხარისხიან Bi_2Te_3 მოდულებისთვის ტიპიურ მნიშვნელობას ($ZT \approx 0.7-1.0$). რამდენად ეფექტიანია მოცემული პელტიეს ელემენტი?

თერმოელექტრული მოვლენები პელტიეს ელემენტში

შეფასების სქემა (15 ქულა)

ნაწილი A: პარაზიტული წინააღმდეგობების, ზეებუკის კოეფიციენტისა (α) და შიგა წინააღმდეგობის (R_{int}) განსაზღვრა (10 ქულა)

A.0 — 0.25 ქულა

კრიტერიუმი	ქულა
ელემენტს აქვს მოდელის აღმნიშვნელი ნარნერა ერთ მხარეს. ნარნერიანი მხარე არის ცივი მხარე.	0.25

A.1 — 0.5 ქულა

საკონტროლო ექსპერიმენტი:

5 ჯამპერი-ნიანგისებრი მომჭერი მიმდევრობით: $R_{\text{total}} = 2.8 \Omega$

ომეტრის სადენების წინააღმდეგობა: $R_{\text{cable}} = 0.1 \Omega$

ერთი მომჭერის წინააღმდეგობა:

$$R_{\text{clip}} = (R_{\text{total}} - R_{\text{cable}}) / 5 = (2.8 - 0.1) / 5 = 0.54 \Omega$$

ცდომილება ერთი გაზომვისთვის: $\delta R_{\text{single}} = 0.1 \Omega$.

ხუთი მომჭერის მიმდევრობით გაზომვისას: $\delta R_{\text{clip}} = 0.1 / 5 = 0.02 \Omega$.

კრიტერიუმი	ქულა
R_{clip} გაზომილია, მნიშვნელობა გონივრულია (0.3–0.7 Ω)	0.2
გამოიყენა რამდენიმე მომჭერი მიმდევრობით ცდომილების შესამცირებლად	0.2
ცდომილება ΔR სწორადაა გამოთვლილი და მითითებული ($\delta R \leq 0.1 \Omega$)	0.1

A.2 — 0.25 ქულა

საკონტროლო ექსპერიმენტი:

ტოლსენის მულტიმეტრი: $R_{\text{შუბი}} = 0.1 \Omega$

მეორე მულტიმეტრი: $R_{\text{შუბი}} = 0.3 \Omega$

კრიტერიუმი	ქულა
$R_{\text{შუბი}}$ გაზომილია	0.25

A.3 — 0.5 ქულა

საკონტროლო ექსპერიმენტი:

ტოლსენის მულტიმეტრი:

დიაპაზონი	R_A (Ω)
60 μA	996
6 mA	101
60 mA	2.6
600 mA	2.6
10 A	0.3

მეორე მულტიმეტრი:

დიაპაზონი	R_A (Ω)
200 μA	1012
2 mA	110.8
20 mA	20
200 mA	11.8
10 A	0.2

კრიტერიუმი	ქულა
R_A გაზომილია სრული დიაპაზონისთვის/არასრული დიაპაზონისთვის	0.3/0.1
მნიშვნელობა გონივრულია	0.2

A.4 — 4 ქულა

ა) ექსპერიმენტის ჩატარება და გაზომვები (1.0 ქულა)

საკონტროლო ექსპერიმენტი: 26 ნერტილი, გაცხელება (#1–16) + გაცივება (#17–26).

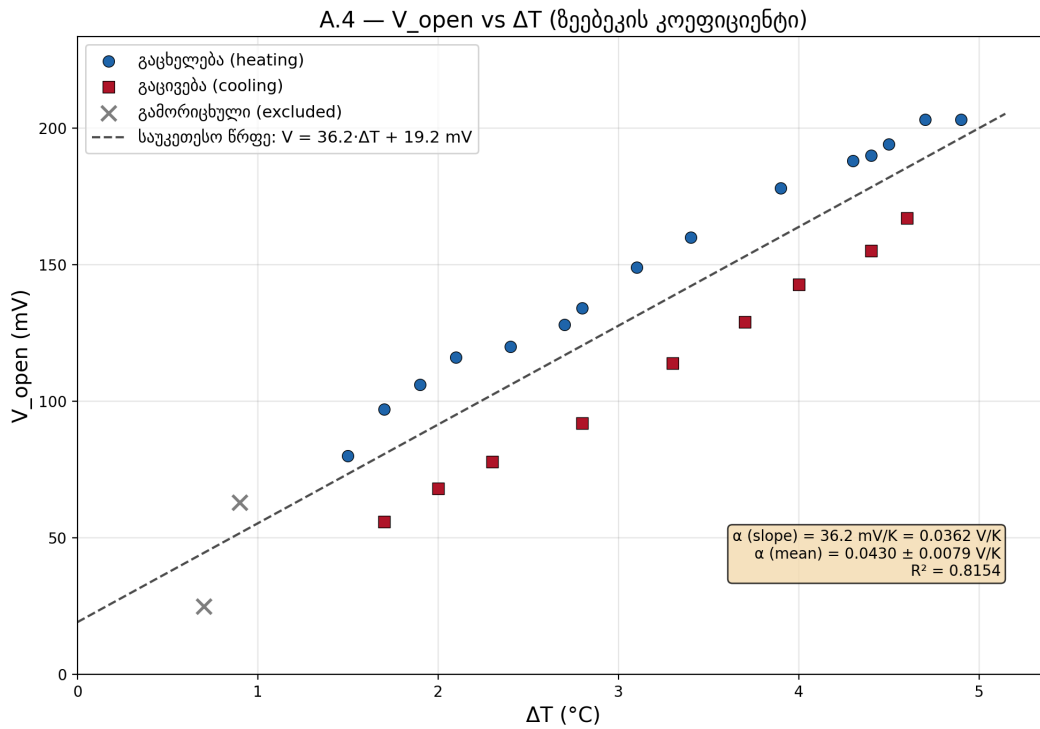
#	V _{open} (mV)	ΔT (°C)	α _i (V/K)	შენიშვნა
1	63	0.9	0.0700	გამორიცხ.
2	80	1.5	0.0533	
3	97	1.7	0.0571	
4	106	1.9	0.0558	
5	116	2.1	0.0552	
6	120	2.4	0.0500	
7	128	2.7	0.0474	
8	134	2.8	0.0479	
9	149	3.1	0.0481	
10	160	3.4	0.0471	
11	178	3.9	0.0456	
12	188	4.3	0.0437	
13	190	4.4	0.0432	
14	194	4.5	0.0431	
15	203	4.7	0.0432	
16	203	4.9	0.0414	
17	167	4.6	0.0363	
18	155	4.4	0.0352	

19	142.7	4.0	0.0357	
20	129	3.7	0.0349	
21	114	3.3	0.0345	
22	92	2.8	0.0329	
23	77.8	2.3	0.0338	
24	68	2.0	0.0340	
25	56	1.7	0.0329	
26	25	0.7	0.0357	გამორიცხ.

კრიტერიუმი	ქულა
სქემის ნახაზი სწორია	0.1
გაზომვები ჩატარებულია გაცხელებისა და გაცივების ფაზებში	0.3
ანათვლების რაოდენობა: N ≥ 25 / N ≥ 18 / N ≥ 10	0.6 / 0.4 / 0.2

ბ) გრაფიკი (1.5 ქულა)

საკონტროლო ექსპერიმენტი: გრაფიკის დახრილობა $\alpha \approx 36.15 \text{ mV/K} = 0.036 \text{ V/K}$.



კრიტერიუმი	ქულა
გრაფიკი აგებულია, წერტილების რაოდენობა გრაფიკზე N ≥ 20 / N ≥ 14 / N ≥ 10	0.7/0.5/0.3
ღერძებზე მითითებულია სიდიდეები და ერთეულები	0.1
გრაფიკი იკავებს ფურცლის $\geq 1/2$ -ს	0.1
გამორიცხული წერტილები მონიშნულია X-ით	0.1
წრფე გავლებულია	0.1
წერტილები თანაბრად გადანაწილებულია წრფის ორივე მხარეს	0.1
α გამოთვლილია, არის 0.025–0.060 V/K / 0.020–0.080 V/K დიაპაზონში	0.3 / 0.2

გ) გამოთვლები (1.5 ქულა)

საკონტროლო ექსპერიმენტი:

გამორიცხული ნერტილები: #1 და #26 ($\Delta T < 1^\circ\text{C}$).

გაცხელების ფაზა საშუალო α : 0.0481 V/K.

გაცივების ფაზა საშუალო α : 0.0345 V/K.

საერთო საშუალო: $\alpha = 0.0430 \pm 0.0079$ V/K (24 ვალიდური ნერტილიდან).

კრიტერიუმი	ქულა
$\alpha_i = V_{\text{open},i} / \Delta T_i$ გამოთვლილია $N \geq 20 / N \geq 14 / N \geq 10$ მონაცემისთვის	0.5/0.3/0.15
დაბალი $\Delta T (< 1^\circ\text{C})$ ნერტილები მონიშნულია გამოსარიცხად	0.1
α გამოთვლილია, არის 0.025–0.060 V/K / 0.020–0.080 V/K დიაპაზონში	0.5 / 0.25
სტანდარტული გადახრა გამოთვლილია	0.4

A.5 — 3 ქულა

ა) ექსპერიმენტის აწყობა და გაზომვები (1.0 ქულა)

საკონტროლო ექსპერიმენტი: 7 გაზომვა, $R_{\text{ext}} = 16.9, 14.7, 12.2, 10, 6.9, 4.7, 2.2 \Omega$ (2.2, 4.7 და 10 Ω წინააღმდეგობის კომბინაციები). დამატებით 1.1 ომი ნიანგისებრი მომჭერების.

#	V_P (mV)	ΔT ($^\circ\text{C}$)	I (mA)	R_{ext} (Ω)	T_c ($^\circ\text{C}$)	T_h ($^\circ\text{C}$)
1	732	6.4	227.5	16.9+1.1	22.8	29.2
2	801	7.2	250.4	14.7+1.1	24.2	31.4
3	904	7.9	282.9	12.2+1.1	25.1	33.0
4	1024	8.5	318.4	10.0+1.1	25.8	34.3
5	1242	10.0	388.0	6.9+1.1	27.5	37.5
6	1480	11.6	446.0	4.7+1.1	29.5	41.1
7	1871	15.8	551.0	2.2+1.1	32.3	48.1

კრიტერიუმი	ქულა
წრედის ნახაზი სწორია	0.1
აღებული ანათვლების რაოდენობა $N \geq 7 / N \geq 5 / N \geq 3$	0.7 / 0.4 / 0.2
ჩანერილია ყველა საჭირო პარამეტრი ($I, V, T_h, T_c, \Delta T$)	0.1
პარაზიტული წინააღმდეგობის არსებობა გათვალისწინებულია	0.1

ბ) გრაფიკი (1.0 ქულა)

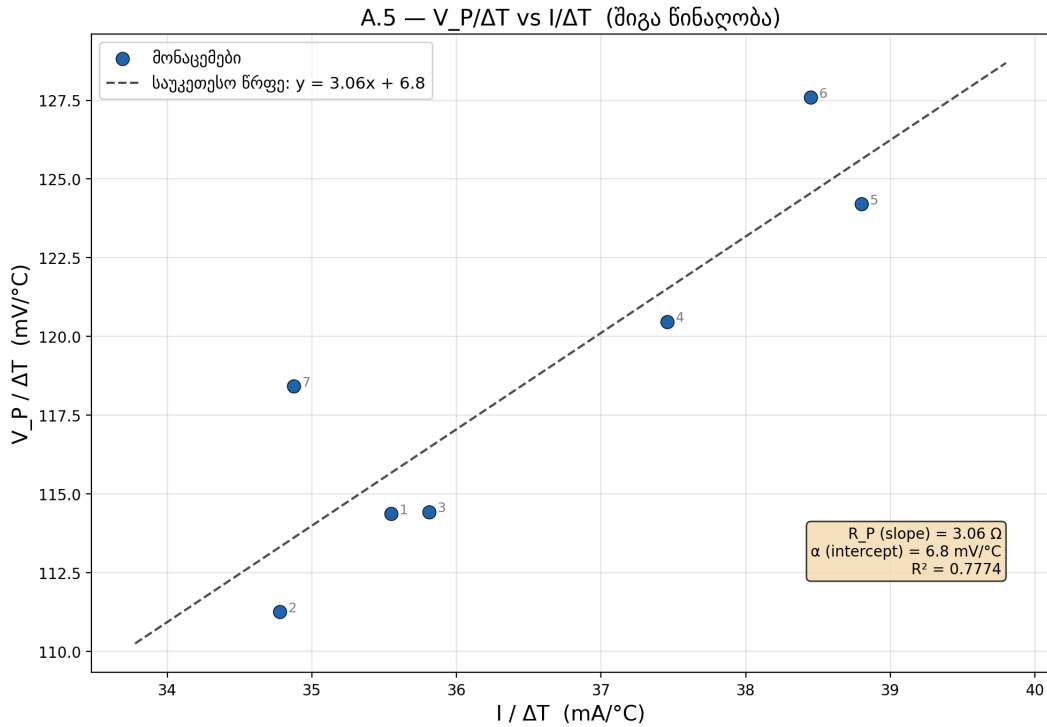
$$V_P / \Delta T = R_P \cdot (I / \Delta T) + \alpha$$

საკონტროლო ექსპერიმენტი:

#	$I/\Delta T$ (mA/ $^\circ\text{C}$)	$V_P/\Delta T$ (mV/ $^\circ\text{C}$)
1	35.55	114.38
2	34.78	111.25
3	35.81	114.43
4	37.46	120.47
5	38.80	124.20
6	38.45	127.59

7	34.87	118.42
---	-------	--------

რეგრესია: $V_P/\Delta T = 3.06 \cdot (I/\Delta T) + 6.85$; $R^2 = 0.78$



კრიტერიუმი	ქულა
$x = I/\Delta T$ და $y = V_P/\Delta T$ სწორადაა გამოთვლილი	0.2
გრაფიკი აგებულია, წერტილების რაოდენობა გრაფიკზე $N \geq 7 / N \geq 5$	0.4/0.2
ლერძებზე მითითებულია სიდიდეები და ერთეულები	0.1
გრაფიკი იკავებს ფურცლის $\geq 1/2$ -ს	0.1
წრფე გავლებულია და წერტილები თანაბრად გადანაწილებულია წრფის ორივე მხარეს	0.2

გ) შედეგები და ანალიზი (1.0 ქულა)

საკონტროლო: $R_P \approx 3.06 \Omega$ (დახრილობიდან), $\alpha \approx 6.85 \text{ mV}/^\circ\text{C} = 0.007 \text{ V}/\text{K}$ (გადაკვეთიდან).

შენიშვნა: $I/\Delta T$ მნიშვნელობები ვიწრო დიაპაზონშია (34.8–38.8), ამიტომ α -ს განსაზღვრა გადაკვეთიდან არა ზუსტია. A.4-ის α -თან შედარებისას სტუდენტმა უნდა აღნიშნოს, რომ გადაკვეთის მნიშვნელობა არასანდოა.

კრიტერიუმი	ქულა
R_P სწორადაა ამოკითხული დახრილობიდან, მნიშვნელობა გონივრულია (1–5 Ω)	0.4 / 0.2
α ამოკითხულია y -ლერძთან გადაკვეთიდან	0.4
α შედარებულია A.4-ის შედეგთან, კომენტარი გაკეთებულია	0.2

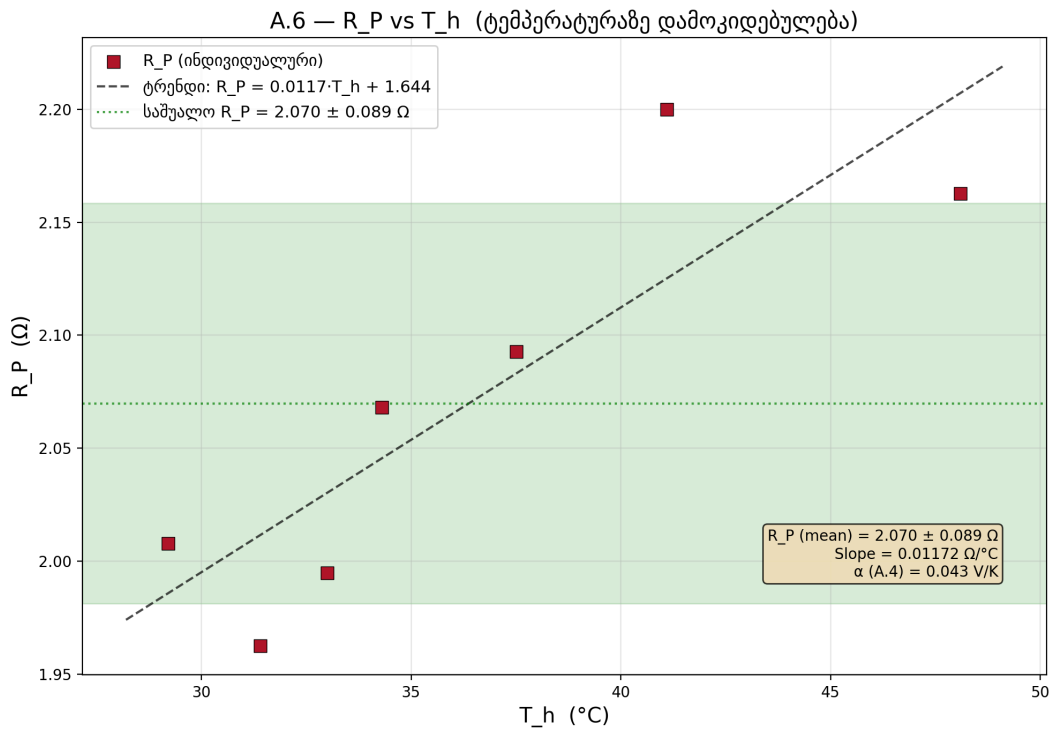
A.6 — 1.5 ქულა

$$R_P = (V_P - \alpha \cdot \Delta T) / I$$

საკონტროლო ექსპერიმენტი: (A.4-ის $\alpha = 0.043 \text{ V/K}$ გამოყენებით)

#	V _P (mV)	$\alpha\Delta T$ (mV)	I (mA)	R _P (Ω)	T _h ($^{\circ}\text{C}$)
1	732	275.2	227.5	2.008	29.2
2	801	309.6	250.4	1.963	31.4
3	904	339.7	282.9	1.995	33.0
4	1024	365.5	318.4	2.068	34.3
5	1242	430.0	388.0	2.093	37.5
6	1480	498.8	446.0	2.200	41.1
7	1871	679.4	551.0	2.163	48.1

$R_P = 2.070 \pm 0.089 \Omega$. R_P vs T_h დახრილობა = $0.012 \Omega/^{\circ}\text{C}$.



კრიტერიუმი	ქულა
$R_P = (V_P - \alpha \cdot \Delta T) / I$ სწორადაა გამოთვლილი თითოეული წერტილისთვის და შეესაბამება ცხრილი	0.3
გრაფიკი აგებულია, წერტილების რაოდენობა გრაფიკზე $N \geq 7 / N \geq 5$	0.4 / 0.2
ღერძებზე მითითებულია სიდიდეები და ერთეულები	0.1
გრაფიკი იკავებს ფურცლის $\geq 1/2$ -ს	0.1
საშუალო R_P გამოთვლილია, მნიშვნელობა გონივრულია (1–5 Ω)	0.3
R_P სტანდარტული გადახრა გამოთვლილია	0.2
კომენტარი ტემპერატურაზე დამოკიდებულებაზე	0.1

ნაწილი B: თერმოელექტრული გენერატორი (5 ქულა)

B.1 — 0.5 ქულა

მე-7 ფორმულის გამოყენებით $P_{max} = (\alpha\Delta T)^2 / (4R_P)$ დამტკიცება.

კრიტერიუმი	ქულა
$dP_L/dI = 0$ ან $dP_L/dR_L = 0$ სწორად ჩანერილია და ამოხსნილია	0.15
$R_L = R_P$ მაქსიმუმისთვის — დამტკიცებულია	0.1
$P_{max} = (\alpha\Delta T)^2 / (4R_P)$ ფორმულა მიღებულია	0.25

B.2 — 1.5 ქულა

საკონტროლო ექსპერიმენტი:

გამაცხელების სტაბილიზაციის შემდეგ $\Delta T \approx 10.4^\circ\text{C}$ (წერედის შეკვრისას ეს ტემპერატურა მცირდება, ამიტომ შეერთებისას ანათვლებს ვიღებთ როდესაც 10.4 დან ტემპერატურა დაეცემა 10.2 გრადუსამდე. შემდეგ გაზომვამდე ველოდებით რომ ტემპერატურა ისევ გაიზარდოს).

წერედის სტრუქტურა: პელტიეს ელემენტის გამოსასვლელებზე მიერთებული იყო ორი ნიანგისებრი მომჭერი ($R_w = 2 \times 0.54 = 1.08 \Omega$ პარაზიტული წინალობა), რომლებითაც გარე წინალობები (R_L) ჩაირთვებოდა წრედში. ბოლო ორი გაზომვა ($n = 8, 9$) — გარე წინალობის გარეშე: $n = 8$ -ში $R_L = 1.1 \Omega$ არის ორი მომჭერის წინალობა, $n = 9$ -ში $R_L = 0.54 \Omega$ — მხოლოდ ერთი მომჭერის.

#	$R_L (\Omega)$	$V_L (mV)$	$\Delta T (^\circ\text{C})$	$P_L (mW)$
1	17.9	265	10.2	3.923
2	15.7	258	10.2	4.240
3	13.3	249	10.2	4.662
4	7.9	228	10.2	6.580
5	5.8	210	10.2	7.603
6	3.3	168	10.2	8.553
7	2.6	151	10.2	8.770
8	1.1	95	10.2	8.205
9	0.54	54	10.2	5.400

კრიტერიუმი	ქულა
წერედის ნახაზი სწორია (პელტიე $\rightarrow R_L$, ვოლტმეტრი R_L -ზე, ამპერმეტრი არ არის)	0.15
ნახაზზე მითითებულია ჯამპერების/მომჭერების წინალობა R_w	0.15
სტაბილიზაციის კრიტერიუმი დაცულია (ΔT სხვაობა $\leq 0.3^\circ\text{C}$)	0.2
გაზომვების რაოდენობა: $N \geq 8 / N \geq 5 / N \geq 3$	0.7 / 0.4 / 0.2
ჩანაწერებში არის 2 ომზე მცირე R_L	0.2
მონაცემები ფიზიკურად გონივრულია (V_L იზრდება R_L -ის ზრდასთან ერთად)	0.1

B.3 — 1.75 ქულა

საკონტროლო ექსპერიმენტი:

P_L გამოთვლილია B.2-ის ცხრილში. მაქსიმუმის მიმდებარე 3 წერტილზე ($n = 6, 7, 8$) პარაბოლის მორგებით:

$$P_L = -0.3121 \cdot R_L^2 + 1.5314 \cdot R_L + 6.8976$$

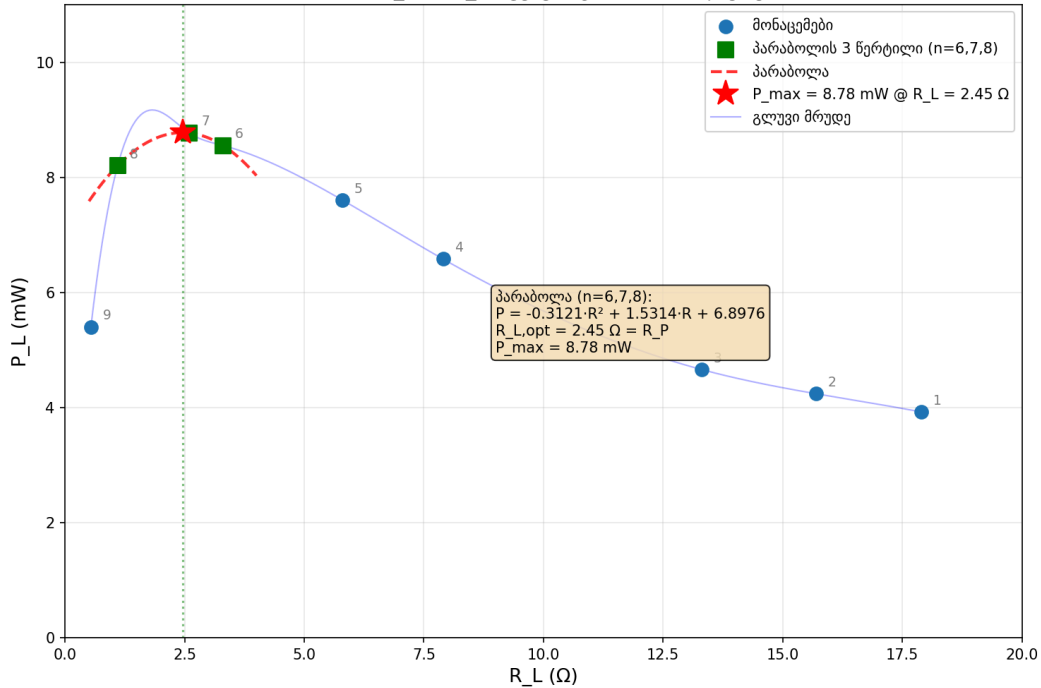
$$R_{L,opt} = -b/(2a) = 2.45 \Omega = R_P$$

$$P_{max,exp} = 8.78 \text{ mW}$$

ვოლტმეტრი R_L -ზეა მიერთებული პირდაპირ, ამიტომ $R_{L,opt}$ პირდაპირ R_P -ს იძლევა — R_w -ს გამოკლება საჭირო არ არის.

A ნაწილის $R_P = 2.07 \Omega$ -თან შედარებით B-ის $R_P = 2.45 \Omega$ ოდნავ მეტია.

B.3 — P_L vs R_L (გენერატორის სიმძლავრე)



კრიტერიუმი	ქულა
$P_L = V_L^2 / R_L$ სწორად გამოთვლილი თითოეული წერტილისთვის	0.2
გრაფიკი აგებულია, წერტილების რაოდენობა გრაფიკზე $N \geq 7 / N \geq 5$	0.6 / 0.2
ღერძებზე მითითებულია სიდიდეები და ერთეულები	0.1
გრაფიკი იკავებს ფურცლის $\geq 1/2$ -ს	0.1
მაქსიმალური სიმძლავრის საპოვნელად გამოყენებულია ინტერპოლაცია ან პარაბოლის მორგება.	0.4
$R_{L,opt}$ მნიშვნელობა გონივრულია $2-3 \Omega / 1-5 \Omega$	0.35 / 0.1

B.4 — 1.25 ქულა

საკონტროლო ექსპერიმენტი:

1.

$$P_{max,exp} = 8.78 \text{ mW} \text{ (პარაბოლის მორგებიდან, B.3).}$$

2.

$$P_{max,th} = (\alpha \Delta T)^2 / (4R_P) = (0.043 \times 10.2)^2 / (4 \times 3.06) = 15.66 \text{ mW}$$

$$P_{max,exp} / P_{max,th} = 0.56 \text{ — ექსპერიმენტული სიმძლავრე ნაკლებია თეორიულზე.}$$

3.

$$ZT = \alpha^2 \cdot T / (R_P \cdot K) = 0.043^2 \times 300.2 / (2.45 \times 0.323) = 0.701$$

$$T = (T_c + T_h)/2 \approx 300.2 \text{ K}, K = 0.323 \text{ W/K (მოცემულია)}.$$

$$\Delta T_{max} = \alpha^2 \cdot T_c^2 / (2 \cdot R_P \cdot K) = 0.043^2 \times 295.2^2 / (2 \times 2.45 \times 0.323) = 101.6 \text{ }^\circ\text{C}$$

4.

$ZT \approx 0.70$ — Bi_2Te_3 -ის ტიპიური დიაპაზონის ქვედა ზღვარზე (0.7–1.0).

კრიტერიუმი	ქულა
$P_{max,exp}$ მნიშვნელობა გონივრულია 5-15 mW / 2-25 mW	0.3/0.15
$P_{max,th} = (\alpha \Delta T)^2 / (4R_P)$ გამოთვლილია A ნაწილის α , R_P და B ექსპერიმენტის ΔT -ისთვის	0.3
$P_{max,exp}$ ნაკლებია $P_{max,th}$	0.2
$ZT = \alpha^2 T / (R_P \cdot K)$ სწორად გამოთვლილია (T კელვინებშია)	0.2
$\Delta T_{max} = \alpha^2 T_c^2 / (2R_P \cdot K)$ გამოთვლილია	0.2
ZT შედარებულია ტიპიურ Bi_2Te_3 მნიშვნელობასთან (0.7–1.0), კომენტარი ადეკვატურია	0.05

შემფასებლის შენიშვნები

- 1. პარაზიტული კორექცია (A.3 → A.5):** თუ სტუდენტმა არ გამოიყენა პარაზიტული კორექცია, მაგრამ ყველა სხვა ნაბიჯი სწორია, გამოაკელით შესაბამისი ქულა მხოლოდ კორექციის კრიტერიუმიდან. ნუ დაასჯით ორმაგად.
- 2. ECF (Error Carry-Forward):** თუ სტუდენტმა A ნაწილში α ან R_P არასწორად გამოთვალა, მაგრამ B ნაწილში სწორად გამოიყენა თავისი მნიშვნელობები, B ნაწილის ქულები არ უნდა შემცირდეს.
- 3. გრაფიკის ხარისხი:** გრაფიკი უნდა იყოს აგებული დანაყოფებიან ქალაქებზე, ლერძები აღნიშნული, სახაზართ გავლებული საუკეთესო წრფე.
- 4. ერთეულები:** ZT გამოთვლისას ტემპერატურა აუცილებლად კელვინებში უნდა იყოს.
- 5. B.3-ში მაქსიმუმის დაზუსტება:** ნებისმიერი გონივრული მეთოდი მისაღებია (პარაბოლის მორგება, ორი წერტილის საშუალო, გრაფიკული ინტერპოლაცია).
- 7. თერმული კონტაქტი B ნაწილში:** მოსალოდნელი $\Delta T > 8 \text{ }^\circ\text{C}$. ძალიან მცირე $\Delta T (< 2^\circ\text{C})$ მიუთითებს ცუდ კონტაქტზე.