

ექსთვიანი ანგარიში კლიმატის, მიკროკლიმატისა და გარემო დიაგნოსტიკის შესახებ

ღმრთისმშობლის შობის სახელობის ტაძარი -
გელათის მონასტერი - საქართველო



საანგარიშო პერიოდი: იანვარი – ივნისი 2026

თარიღი: 14/07/2026

ავტორები:

პროფ. დარიო კამუფო (CNR-ISAC)

დოქტ. ანტონიო დელა ვალე (CNR-ISAC)

დოქტ. რობერტა ჯიორიო (CMR LAB srl)

დამკვეთი: გელათის რეაბილიტაციის დროებითი კომიტეტი

სარჩევი

1. მიზანი	4
2. სენსორების განლაგება.....	4
3. ატმოსფერული ცვლადების ფიზიკური მნიშვნელობა.....	5
ფარდობითი ტენიანობა.....	5
შერევის კოეფიციენტი	5
ნამის წერტილი (°C): კონდენსაციის ტემპერატურა	6
4. მონაცემთა ანალიზი	8
ჰაერის ტემპერატურა	8
ჰაერის ტემპერატურა (°C) – ყველა სენსორი.....	8
ჰაერის ტემპერატურა – გუმბათი (სენსორი 3).....	9
ჰაერის ტემპერატურა – მოზაიკა (სენსორი 4)	9
ჰაერის ტემპერატურა – მოზაიკა (სენსორი 5)	10
ჰაერის ტემპერატურა – ტაძრის ქვედა ნაწილი (სენსორი 6)	10
ჰაერის ტემპერატურა – შესასვლელი სივრცე (სენსორი 7)	9
თერმული სტრატეფიკაცია – გუმბათისა (3) ტაძრის ქვედა დონეს შორის (6).....	11
თერმული სტრატეფიკაცია – მოზაიკა	12
ფარდობითი ტენიანობა	12
ფარდობითი ტენიანობა – ყველა სენსორი	12
ფარდობითი ტენიანობა – გუმბათი (სენსორი 3)	13
ფარდობითი ტენიანობა – მოზაიკა (სენსორი 4).....	14
ფარდობითი ტენიანობა– მოზაიკა (სენსორი 5).....	15
ფარდობითი ტენიანობა– ტაძრის ქვედა ნაწილი (სენსორი 6)	15
ფარდობითი ტენიანობა – შესასვლელი სივრცე (სენსორი 7).....	16
ფარდობითი ტენიანობის სტრატეფიკაცია– გუმბათსა და (3) ტაძრის ქვედა დონეს შორის (6).....	17
ფარდობითი ტენიანობის სტრატეფიკაცია – მოზაიკა	17
შერევის კოეფიციენტი	18
შერევის კოეფიციენტი — ყველა სენსორი	18
შერევის კოეფიციენტი — გუმბათი (სენსორი 3)	18
შერევის კოეფიციენტი — მოზაიკა (სენსორი 4).....	19
შერევის კოეფიციენტი — მოზაიკა (სენსორი 5).....	19
შერევის კოეფიციენტი – ტაძრის ქვედა ნაწილი (სენსორი 6).....	20
შერევის კოეფიციენტი – შესასვლელი სივრცე (სენსორი 7)	20
ტენშემცველობის სტრატეფიკაცია გუმბათსა (3) და ტაძრის ქვედა დონეს შორის (6).....	21
ტენშემცველობის სტრატეფიკაცია – მოზაიკა.....	22

ზედაპირისა და ჰაერის ტემპერატურები.....	23
გუმბათი – ზედაპირისა და ჰაერის ტემპერატურა.....	23
მოზაიკა – ზედაპირისა და ჰაერის ტემპერატურები	24
მოზაიკა (ქვედა მხარე) – ზედაპირისა და ჰაერის ტემპერატურები.....	25
შესასვლელი სივრცე და იატაკის დონის ჰაერი და ზედაპირი	25
ნამის წერტილი და კონდენსაცია	26
გუმბათი — კონდენსაცია	26
მოზაიკა (ზედა მხარე) — კონდენსაცია.....	27
მოზაიკა (ქვედა მხარე) — კონდენსაცია	27
შესასვლელი სივრცე - კონდენსაცია	28
იატაკის დონე - კონდენსაცია	28
5. დასკვნები 2026 წლის პირველი ნახევრის მონიტორინგის შესახებ	30
შენობის საპასუხო რეაქციის ცვლილება დროთა განმავლობაში	31
შიდა და გარე ჰაერის ტემპერატურების ცვლილების დინამიკა დროთა განმავლობაში.....	31
შიდა აორთქლება, ტენის შთანთქმა, კონდენსაცია	32
მსჯელობა იატაკის კონდენსაციასა და კონსერვაციულ გათბობაზე	33
6. შესაბამისი ევროპული სტანდარტები	34

1. მიზანი

2025 წლის 21 ნოემბრის №25 (პროფ. დარიო კამუფო), №26 (დოქტ. ანტონიო დელა ვალე) და №27 (CMR Lab srl) ხელშეკრულებებით განსაზღვრული ვალდებულებების საფუძველზე, წინამდებარე ანგარიშში წარმოდგენილია გელათის მონასტრის ღვთისმშობლის შობის ტაძარში დამონტაჟებული თანამედროვე (მოწინავე) მონიტორინგის სისტემის მეშვეობით, 2026 წლის პირველი 6 თვის განმავლობაში (იანვრიდან ივნისის ჩათვლით) განხორციელებული მიკროკლიმატის მონიტორინგის მონაცემთა ინტერპრეტაცია.

თანამედროვე მონიტორინგის სისტემის დეტალური აღწერილობა მოცემულია წინა, 2026 წლის 30 იანვრის ანგარიშში (დანართი 7.3.5).

2. სენსორების განლაგება

ქვემოთ მოცემულ ნახაზზე ნაჩვენებია მონიტორინგის სენსორების განლაგება ტაძრის შიგნით, აღმოსავლეთისა და სამხრეთის ჭრილების (სექციების) მიხედვით. შიდა ჰაერის ტემპერატურისა და ფარდობითი ტენიანობის სენსორები განთავსებულია გუმბათზე (სენსორი 3), მოზაიკის ზედა და ქვედა ღონეებზე (სენსორები 4 და 5), ტაძრის ქვედა ნაწილსა (სენსორი 6) და შესასვლელი სივრცის ზონაში (სენსორი 7). ზედაპირის ტემპერატურის შესაბამისი ზონდები აკონტროლებს გუმბათს, სხვადასხვა სიმაღლეზე არსებულ მოზაიკას, შესასვლელი სივრცის ქვის წყობასა და იატაკს, ხოლო გარე სენსორი გვაწვდის გარე გარემოს საცნობარო მონაცემებს, რომლებიც შედარებისთვის გამოიყენება.



3. ატმოსფერული ცვლადების ფიზიკური მნიშვნელობა

ფარდობითი ტენიანობა

ფარდობითი ტენიანობა (RH) არის პარამეტრი, რომელიც ასახავს წყლის ორთქლის გაჯერების ხარისხს (და არა ჰაერის გაჯერებას!), ანუ იმას, თუ რამდენად ახლოს ან შორს არის წყლის ორთქლი გაჯერების მდგომარეობიდან.

როდესაც გაჯერების ზღვარს გადავაჭარბებთ, H₂O-ის ზოგიერთი მოლეკულა კონდენსაციის გზით გამოიყოფა სისტემიდან.

ფარდობითი ტენიანობა (RH) არის შეფარდება წყლის ორთქლის მიმდინარე (ფაქტობრივ) $e_{sat}(t)$ პარციალურ წნევასა და იმავე t (°C) ტემპერატურისა და წნევის (hPa) პირობებში მის გაჯერებულ ორთქლის წნევას შორის, რომელიც გამოისახება გაჯერების მნიშვნელობის პროცენტულ მაჩვენებელში (%).

$$RH = 100 \frac{e}{e_{sat}(t)}$$

RH იცვლება, როდესაც იცვლება ტენიანობის შემცველობა, ტემპერატურა, ჰაერის მასის მოცულობა ან გარემო წნევა.

ვინაიდან მნიშვნელი $e_{sat}(t)$ ექსპონენციალურია, მათემატიკურად არასწორია ისეთი არითმეტიკული გამოთვლების წარმოება, როგორიცაა დღიური ან თვიური საშუალო მაჩვენებლები. უმჯობესი და რეკომენდებულია მონაცემების წარმოდგენა სიხშირის ან პროცენტულების სახით.

შერევის კოეფიციენტი

ტენიანი ჰაერის შერევის კოეფიციენტი (MR) არის წყლის ორთქლის მასის m_{H_2O} შეფარდება მშრალი ჰაერის მასასთან $m_{N_2+O_2}$ რომელშიც გაბნეულია H₂O -ის მოლეკულები.

ეს შეფარდება წარმოადგენს ამ ორი აირადი ნივთიერების, კერძოდ H₂O -ისა და (N₂ + O₂) -ის წონით ნარევს, ისევე როგორც მათი მოლეკულების რაოდენობის თანაფარდობას, ანუ n_{H_2O} და $n_{N_2+O_2}$

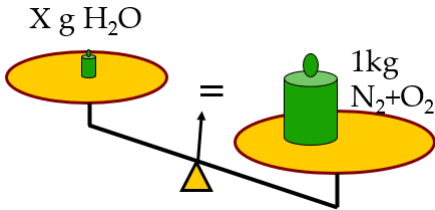
$$MR = \frac{m_{H_2O}}{m_a} = 0.622 \frac{n_{H_2O}}{n_{N_2+O_2}}$$

შერევის კოეფიციენტი (MR) შეიძლება გამოიანგარიშდეს ტემპერატურის (t) და ფარდობითი ტენიანობის (RH) მნიშვნელობებიდან, თუ ცნობილია ბარომეტრული წნევა p (hPa), შემდეგი ფორმულის გამოყენებით:

$$MR = 38.015 \times \frac{10^{\frac{7.65t}{10243.12+t}} \times RH}{p - \left(0.06112 \times 10^{\frac{7.65t}{10243.12+t}} \times RH \right)} \text{ (gkg}^{-1}\text{)}$$

MR არის ნებისმიერი ჰაერის მასის უნიკალური მახასიათებელი ნიშანი (ეგრეთ წოდებული „თითის ანაბეჭდი“), ვინაიდან ის უცვლელია ჰაერის ტემპერატურის, წნევისა და მოცულობის ცვლილების მიმართ. მისი მნიშვნელობა შეიძლება შეიცვალოს მხოლოდ იმ შემთხვევაში, თუ მოხდება წყლის მოლეკულების დამატება (აორთქლება, ტრანსპირაცია) ან გამოკლება (სორბცია, კონდენსაცია), ან თუ ადგილი ექნება მის შერევას უფრო მშრალ ან ტენიან ჰაერთან

ეს შესაძლებლობას გვაძლევს ამოვიცნოთ ტენის მიმოცვლა, მისი წყაროები და შთანთქმის კერები.



ზემოაღნიშნული განმარტებებიდან გამომდინარე, შერევის კოეფიციენტი შეიძლება განვიხილოთ, როგორც პარამეტრი, რომელიც გვიჩვენებს H_2O -ის მოლეკულების N რაოდენობას, რომელიც შერეულია მშრალი ჰაერის 1000 მოლეკულასთან, ე.ი. $MR = k N/1000$ (სადაც k არის პროპორციულობის კოეფიციენტი).

განვიხილოთ შენობა და შევადაროთ MR -ის მნიშვნელობები შიგნით და გარეთ, ე.ი., $MR_{in} = k N_{in}/1000$ and $MR_{out} = k N_{out}/1000$.

სამი შემთხვევაა შესაძლებელი:

1. $MR_{in} = MR_{out}$, ანუ. $N_{in} = N_{out}$. როდესაც მოლეკულების რაოდენობა N ერთნაირია შენობის შიგნით და გარეთ, არც კონდენსაცია და არც აორთქლება არ ხდება.
2. $MR_{in} < MR_{out}$, ანუ $N_{in} = N_{out} - C$. როდესაც შენობის შიგნით MR (ტენშემცველობა) უფრო დაბალია, ვიდრე გარეთ, ეს ნიშნავს, რომ H_2O მოლეკულების გარკვეული C რაოდენობა გარე ჰაერიდან მოცილებულ იქნა შიდა კედლებზე ან იატაკზე სორბციის ან კონდენსაციის შედეგად.
3. $MR_{in} > MR_{out}$, ანუ $N_{in} = N_{out} + E$. როდესაც შენობის შიგნით MR (ტენშემცველობა) უფრო მაღალია, ვიდრე გარეთ, ეს ნიშნავს, რომ H_2O მოლეკულების გარკვეული E რაოდენობა დაემატა გარე ჰაერს კედლებიდან აორთქლების ან ადამიანების მიერ ტენის გამოყოფის (ტრანსპირაციის) შედეგად.

ნამის წერტილი($^{\circ}C$): კონდენსაციის ტემპერატურა

ნამის წერტილის ტემპერატურა (DP) არის ტემპერატურა, რომლის დროსაც ტენიანი ჰაერის მასა აღწევს გაჯერებას (მუდმივი ტემპერატურისა და წნევის პირობებში).

მარტივად რომ ვთქვათ, DP არის ნებისმიერი ჰაერის მასის დამახასიათებელი ტემპერატურა: **კონდენსაციის ტემპერატურული ზღვარი**. განვიხილოთ ზედაპირი, რომლის ტემპერატურაა T_s

როდესაც $T_s > DP$ კონდენსაცია შეუძლებელია;

როდესაც $T_s = DP$ წონასწორობის ზღვარია, სადაც აორთქლება = კონდენსაციას;

როდესაც $T_s < DP$ ზედაპირზე წარმოიქმნება კონდენსატი (ნამი).

ზედაპირზე კონდენსაცია შეიძლება მოხდეს მხოლოდ მაშინ, როდესაც მისი ტემპერატურა T_s ნამის წერტილზე DP დაბლა ეცემა.

შენიშვნა: უნდა აღინიშნოს, რომ კედლის გამომარილებამ (ეფლორესცენციამ) ან ხსნადი მარილებით დაბინძურებამ, ფარდობითი ტენიანობის RH გარკვეულ კრიტიკულ დონეებზე, შესაძლოა გამოიწვიოს წყლის შთანთქმა ნესტიანობისგან გათხევადების (დელიკვესცენციის) გზით. ეს არის ფიზიკური ქიმიის კიდევ ერთი მექანიზმი, რომელიც არ უნდა აგვერიოს კონდენსაციაში.

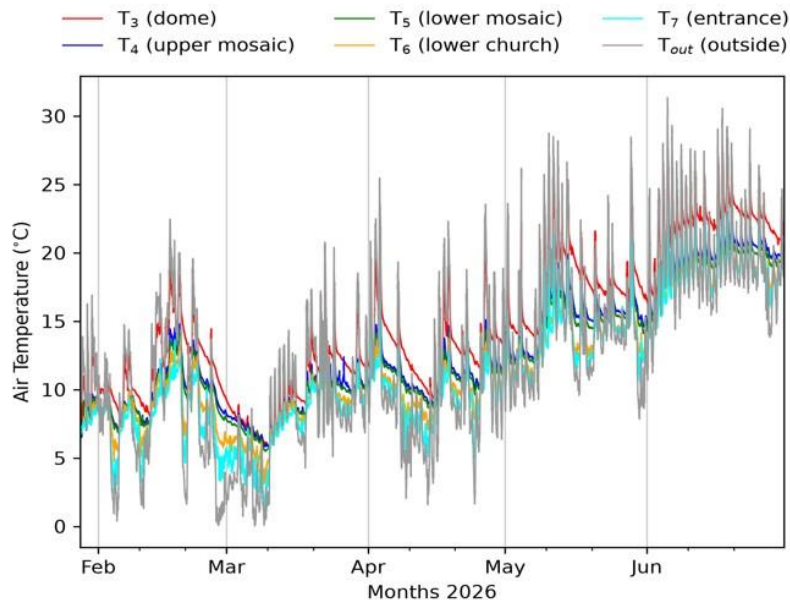
ნამის წერტილის ტემპერატურა (DP) გამოითვლება ტემპერატურის (t) და ფარდობითი ტენიანობის (RH) მნიშვნელობებიდან შემდეგი ფორმულის გამოყენებით:

$$DP = \frac{243.12 \times \ln \left(10^{\frac{7.65t}{243.12+t}} \times \frac{RH}{100} \right)}{17.62 - \ln \left(10^{\frac{7.65t}{243.12+t}} \times \frac{RH}{100} \right)} (^{\circ}\text{C})$$

4. მონაცემთა ანალიზი

ჰაერის ტემპერატურა

ჰაერის ტემპერატურა (°C) – ყველა სენსორი



ზოგადი მიმოხილვა წარმოაჩენს რამდენიმე დამახასიათებელ კანონზომიერებას (მახასიათებელს):

ყველა სენსორი აჩვენებს ერთმანეთთან მჭიდროდ დაკავშირებულ მნიშვნელობებს გარდატეხის (ექსტრემუმის) საერთო წერტილებით, თუმცა ტენდენციები სხვადასხვა ხარისხით არის გათანაბრებული

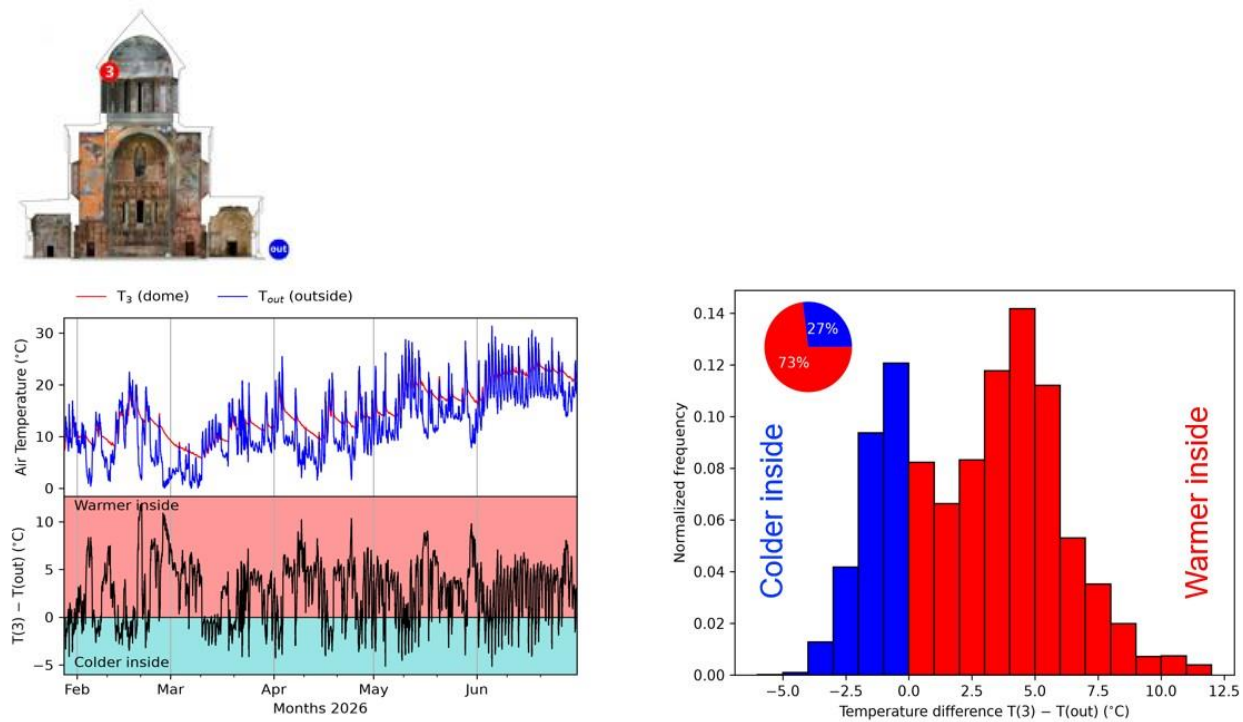
გარე ჰაერის ტემპერატურას (T_{out}) აქვს უფრო ფართო დიაპაზონი, ვიდრე შიდა ტემპერატურებს — ის აღწევს უფრო მაღალ მნიშვნელობებს ღრისით და უფრო დაბალს ღამით.

შენობის კონსტრუქცია აკავებს (არბილებს) შიდა ჰაერის ტემპერატურის ექსტრემალურ მაჩვენებლებს.

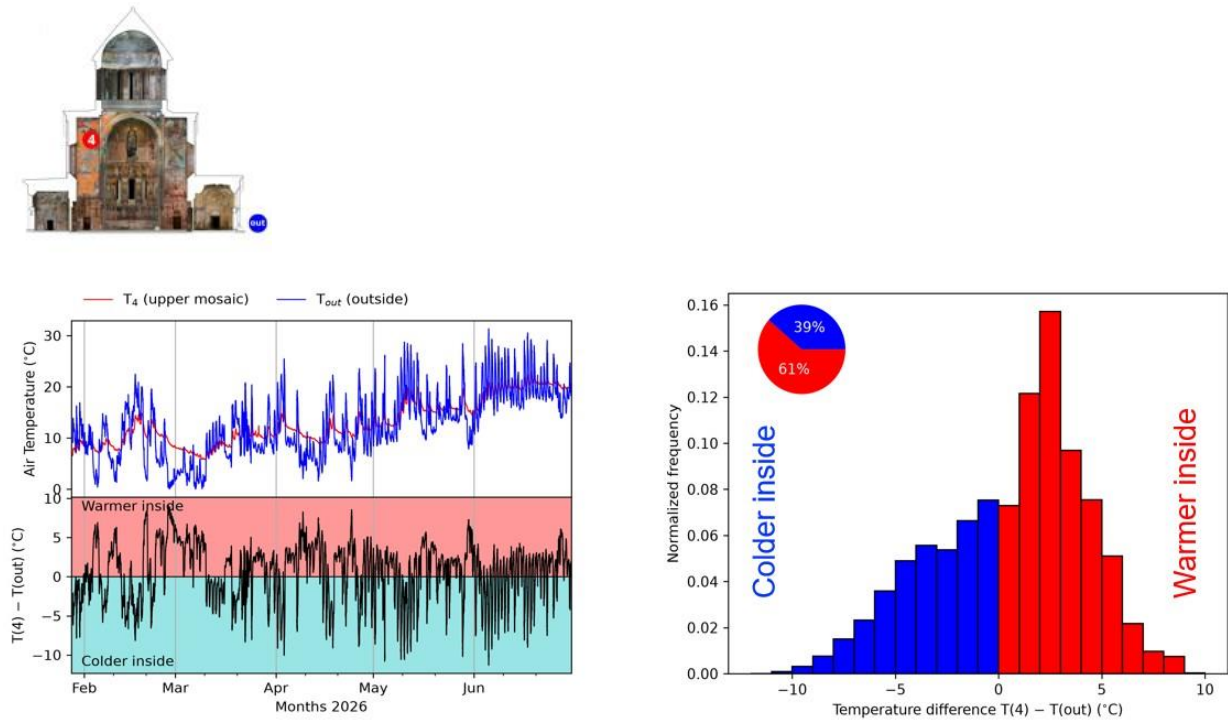
შიდა ჰაერს ახასიათებს მკაფიოდ გამოხატული ტემპერატურული დაშრევა (სტრატიფიკაცია), სადაც მაქსიმალურიდან მინიმალურამდე მნიშვნელობები განაწილებულია შემდეგი თანმიმდევრობით: გუმბათი (T_3), მოზაიკის ზედა ნაწილი (T_4), მოზაიკის ქვედა ნაწილი (T_5), ტაძრის ქვედა ნაწილი (T_6) და შესასვლელი სივრცე (T_7).

მომდევნო გრაფიკებზე ზედა დიაგრამა ასახავს შიდა და გარე ტემპერატურების შედარებას, ხოლო ქვედა დიაგრამა და ჰისტოგრამა რაოდენობრივად გამოხატავს ტემპერატურულ სხვაობებსა და მათ სიხშირეს.

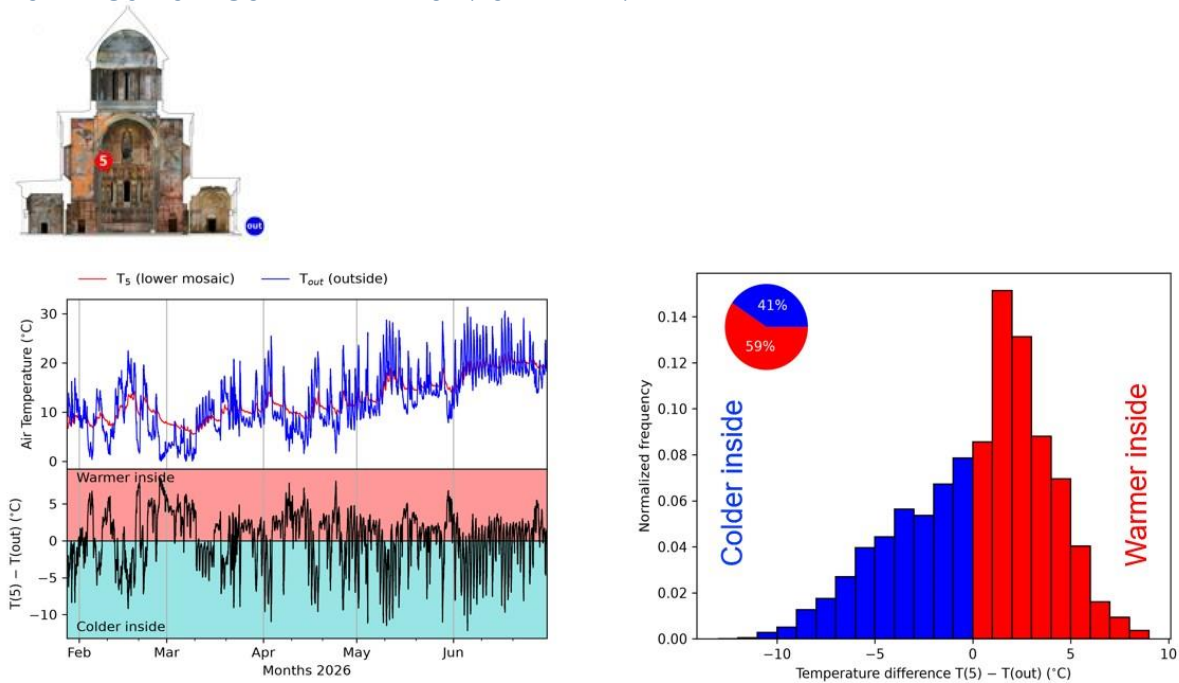
ჰაერის ტემპერატურა — გუმბათი (სენსორი 3)



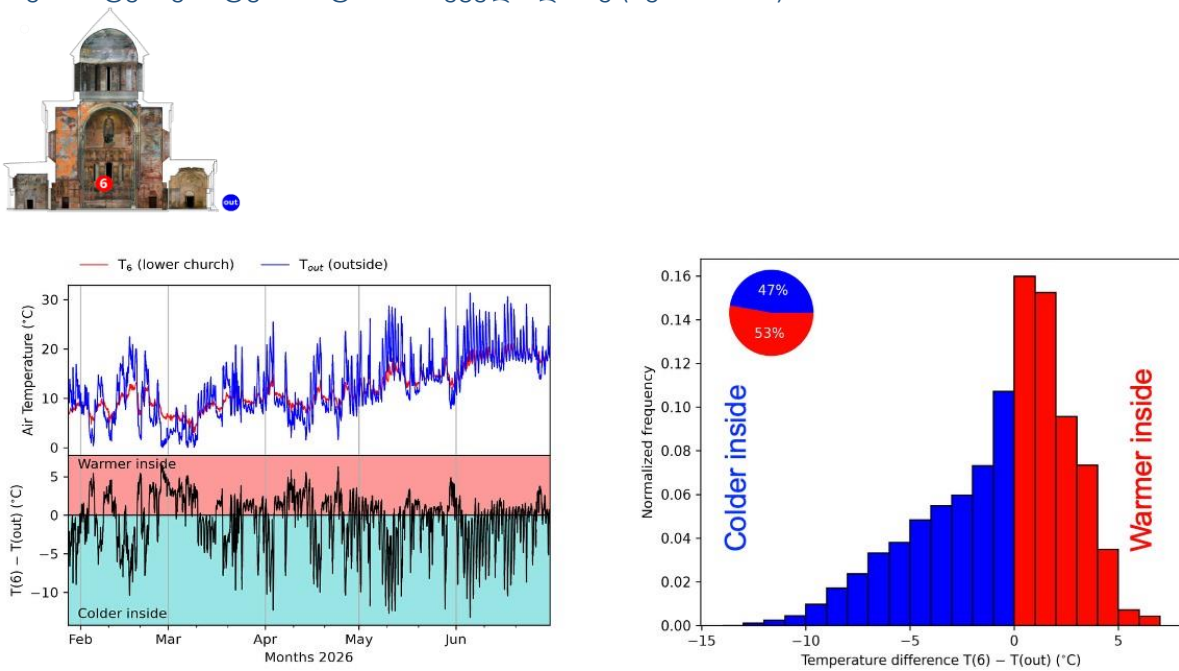
ჰაერის ტემპერატურა — მოზაიკა (სენსორი 4)



ჰაერის ტემპერატურა — მოზაიკა (სენსორი 5)

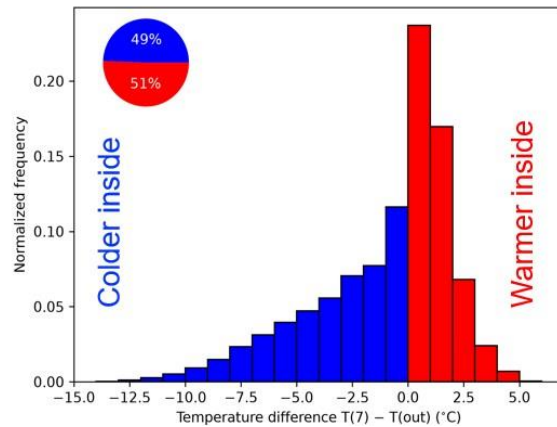
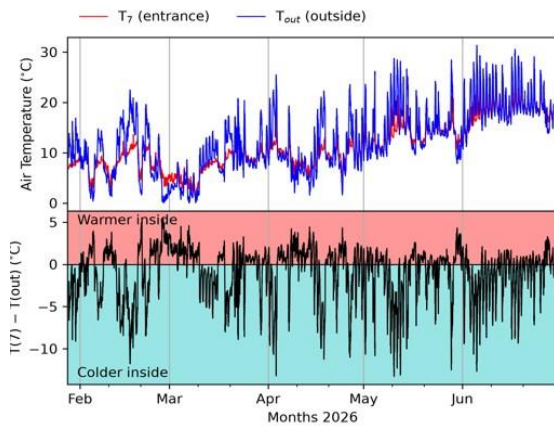


ჰაერის ტემპერატურა — ტაძრის ქვედა ღონე (სენსორი 6)



ჰაერის ტემპერატურა — შესასვლელი სივრცე (სენსორი 7)

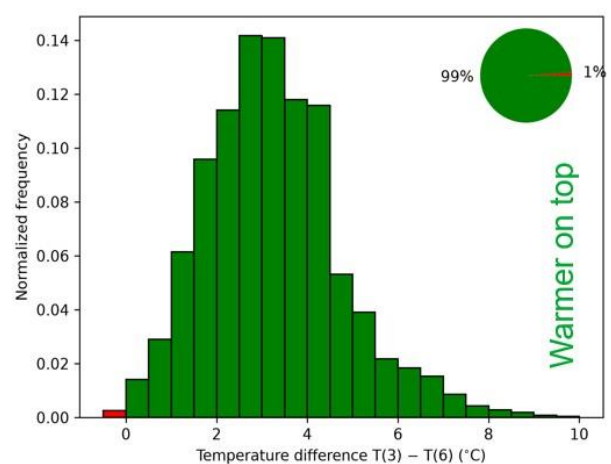
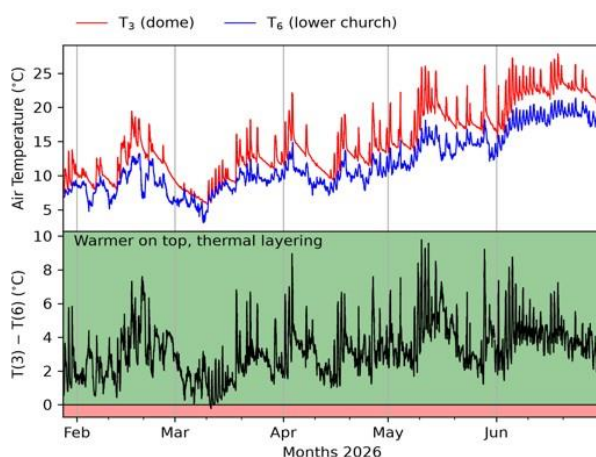
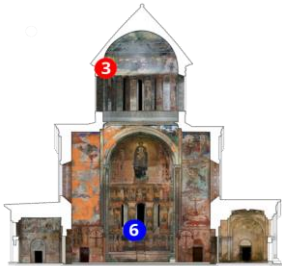




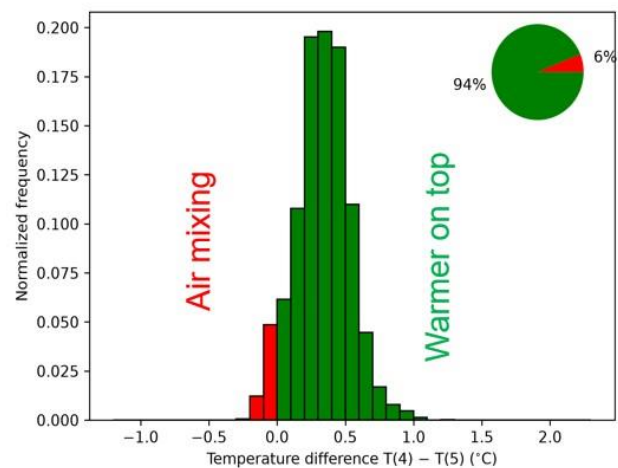
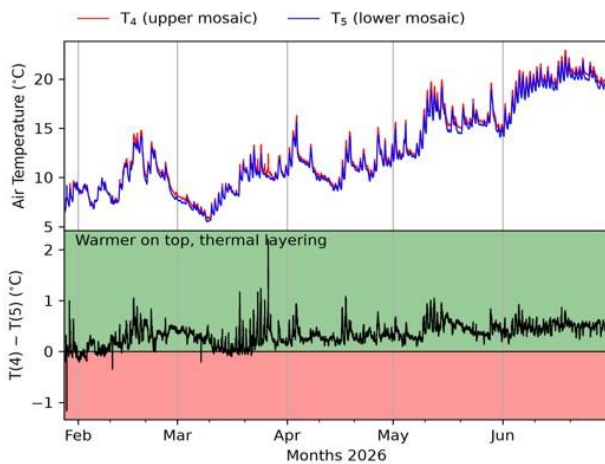
გუმბათის ტემპერატურა (T_3) დროის 73%-ში უფრო მაღალია, ვიდრე გარე ტემპერატურა, ანუ უფრო ხანგრძლივი პერიოდის განმავლობაში, ვიდრე ქვედა ღონეებზე. შესასვლელ სივრცეში შიდა ტემპერატურა გარე ტემპერატურას ყველაზე ნაკლები დროის განმავლობაში აღემატება — კერძოდ, დროის 51%-ში. მიუხედავად ამისა, შიდა ტემპერატურა გარე ტემპერატურას მაქსიმუმ მხოლოდ 5°C -ით აჭარბებს, მაშინ როდესაც გარე ტემპერატურაზე დაბალი მაჩვენებელი -12.5°C -ს აღწევს.

შიდა სივრცეში არსებული სიცივე, რაც გამოწვეულია იატაკისა და კედლების თერმული ინერციით (რომელიც დაგვიანებით მიჰყვება ბუნებრივ დათბობას ან გარდამავალ თბილ სეზონს), შესაძლოა განაპირობებდეს იატაკსა და ცივ ზედაპირებზე კონდენსაციის წარმოქმნას, როგორც ეს მოგვიანებით იქნება განხილული.

თერმული სტრატეფიკაცია – გუმბათი (3) ტაძრის ქვედა ღონესთან მიმართებით (6)



თერმული სტრატეფიკაცია – მოზაიკა

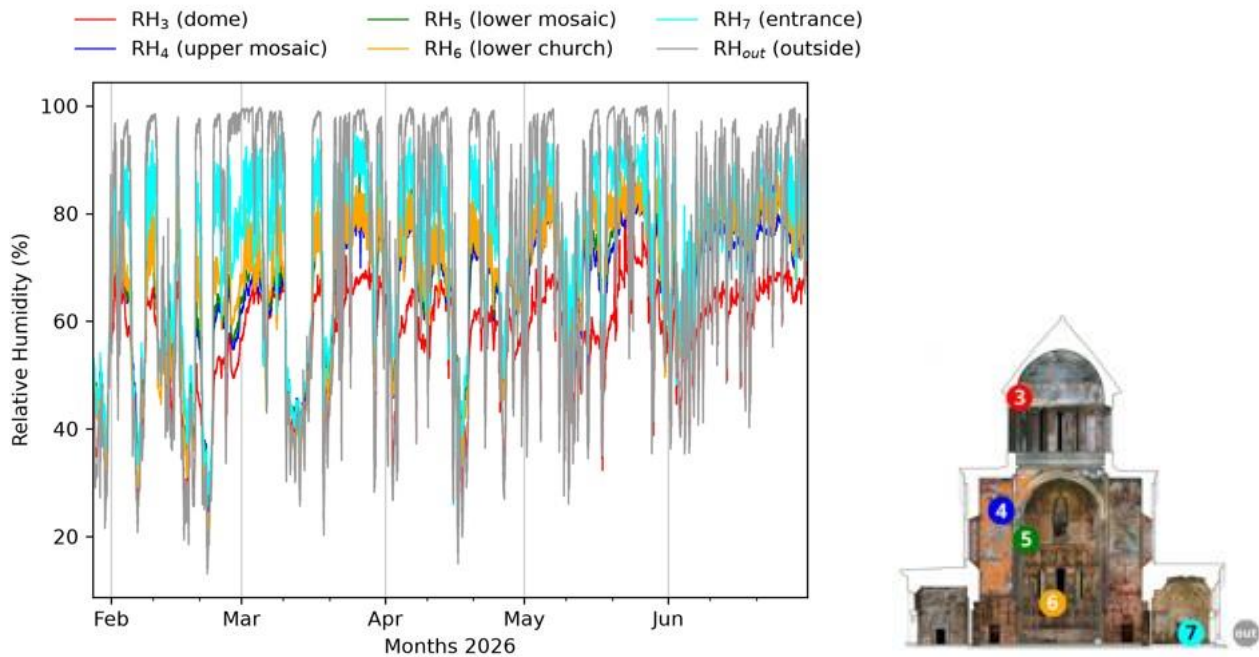


ყველა გრაფიკი, რომელიც გვიჩვენებს ტემპერატურულ სხვაობას ჰაერის გარკვეულ დონესა და უფრო ქვედა დონეს შორის, დადებით მნიშვნელობებს აჩვენებს დროის 94-99%-ში. შიდა სტრატეფიკაცია ყველაზე სტაბილური მდგომარეობაა. ვერტიკალური შერევა ხდება მხოლოდ გამონაკლის შემთხვევებში და შესაძლოა უკავშირდებოდეს კონკრეტულ მოვლენებს, როგორიცაა კარებისა და ფანჯრების გაღება.

გუმბათსა და ტაძრის ქვედა დონეს შორის სხვაობა ზოგადად რამდენიმე გრადუსია და ადასტურებს მყარ ვერტიკალურ ტემპერატურულ გრადიენტს. ამის საპირისპიროდ, სხვაობა ზედა და ქვედა მოზაიკის დონეებს შორის ბევრად უფრო მცირეა, რაც აჩვენებს, რომ ჰაერი მოზაიკის გარშემო თითქმის ჰომოგენურია სიმაღლის ამ შეზღუდულ დიაპაზონში.

ფარდობითი ტენიანობა

ფარდობითი ტენიანობა – ყველა სენსორი



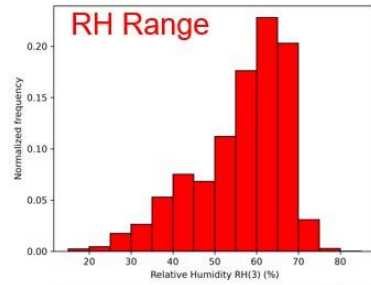
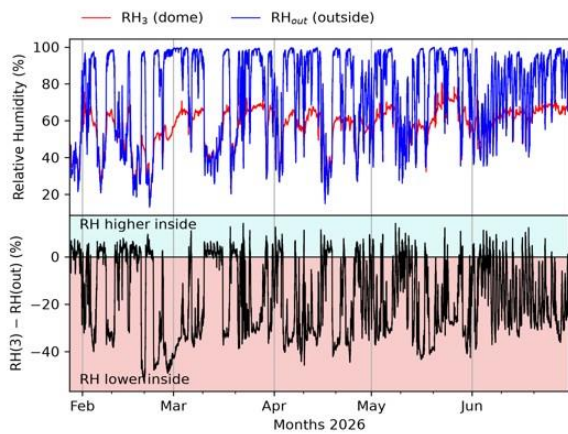
უნდა გვახსოვდეს, რომ ფარდობითი ტენიანობა (RH) კონსერვაციისთვის მეტად მნიშვნელოვანი ფიზიკური ცვლადია, თუმცა ნაკლებად გამოსადეგია გარემო დიაგნოსტიკის მიზნებისთვის, ვინაიდან ის ფიზიკურად განისაზღვრება ჰაერის ტემპერატურითა და ტენზომეტრული (შერევის კოეფიციენტით), ხოლო მიღებული შედეგების ინტერპრეტაცია მხოლოდ ამ პირველად ცვლადებზე დაყრდნობით არის შესაძლებელი.

გარე ფარდობითი ტენიანობის (RH) დიაპაზონი მერყეობს სრული გაჯერებიდან (100% RH) უკიდურესად მშრალ პირობებამდე (10-20% RH), რაც ხასიათდება დღე-ღამური მკვეთრი ცვალებადობით.

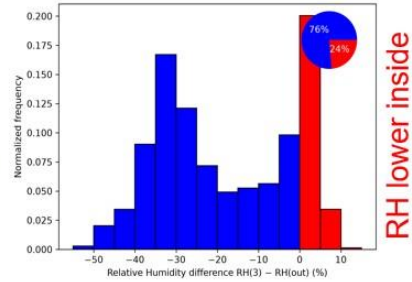
შიდა ფარდობითი ტენიანობის (RH) დიაპაზონი უფრო ვიწრო და ბევრად უფრო სტაბილურია, მცირე დღე-ღამური ცვალებადობით

ფარდობითი ტენიანობა – გუმბათი (სენსორი 3)

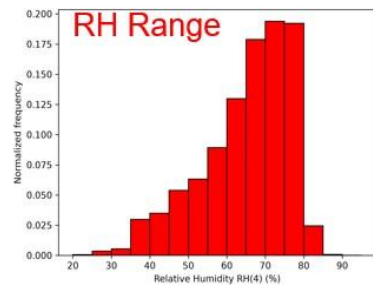
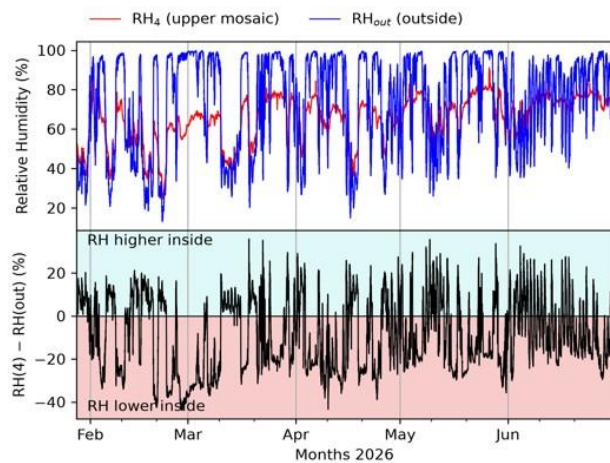




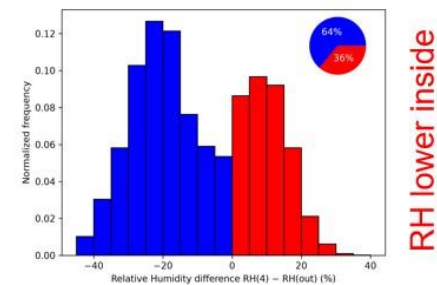
RH higher inside



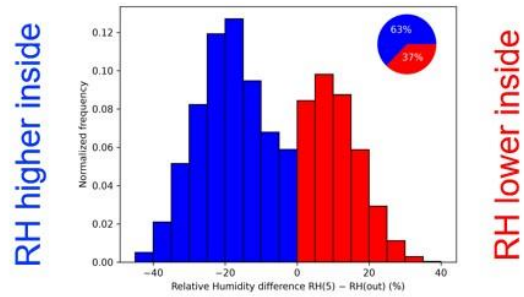
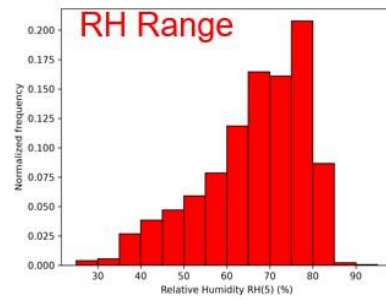
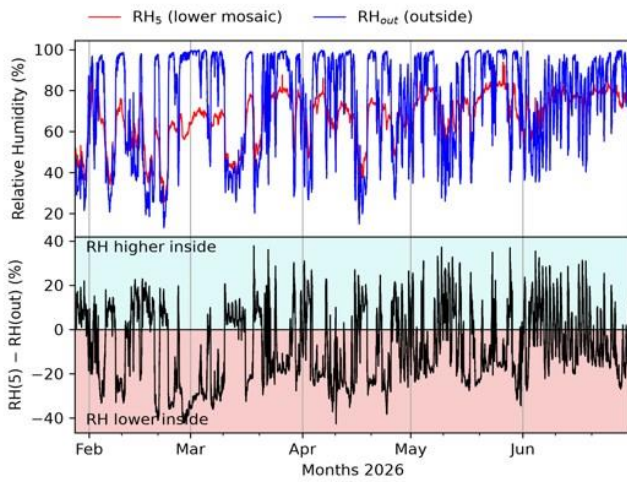
ფარდობითი ტენიანობა – მოზაიკა (სენსორი 4)



RH higher inside

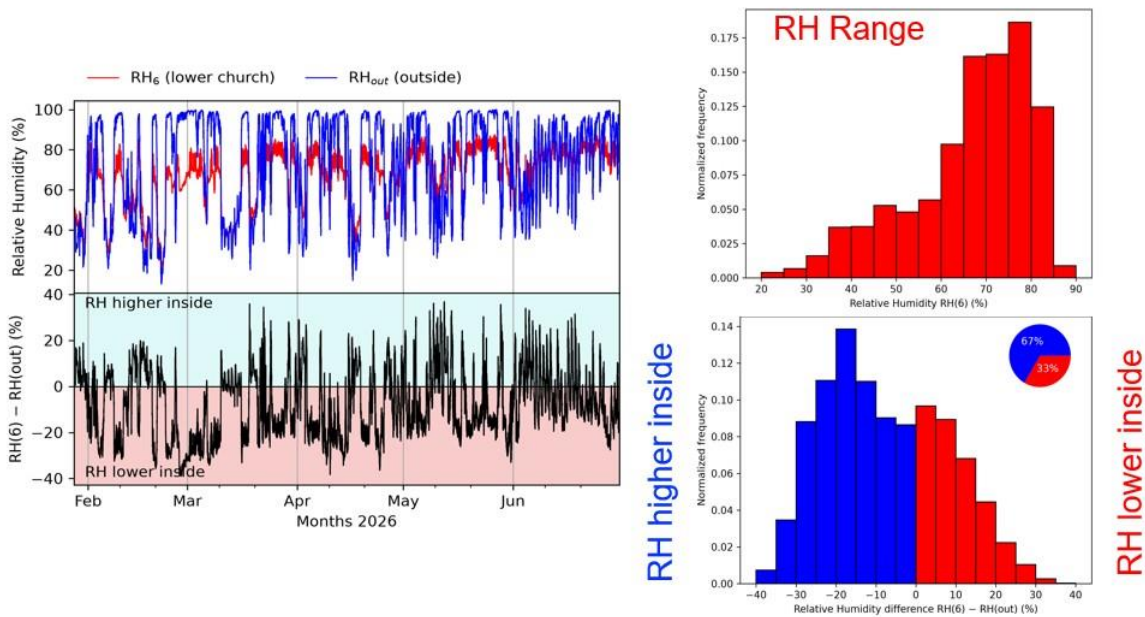


ფარდობითი ტენიანობა – მოზაიკა (სენსორი 5)

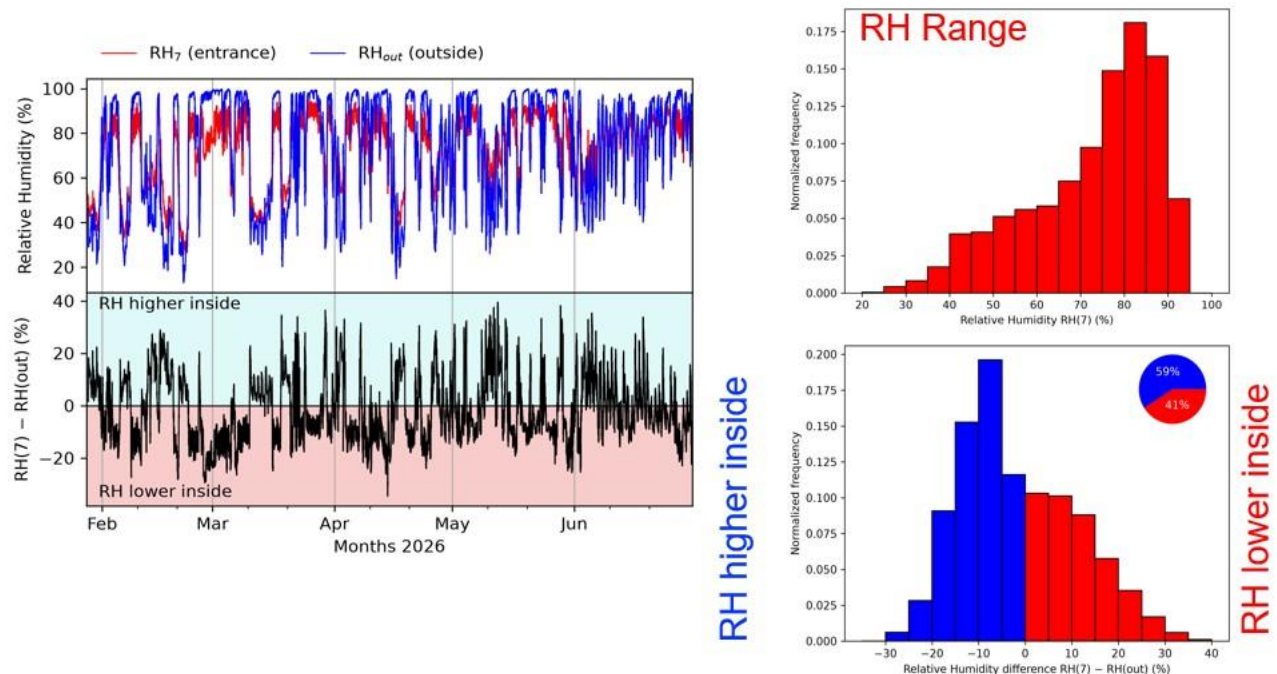


ფარდობითი ტენიანობა – ტაძრის ქვედა დონე (სენსორი 6)





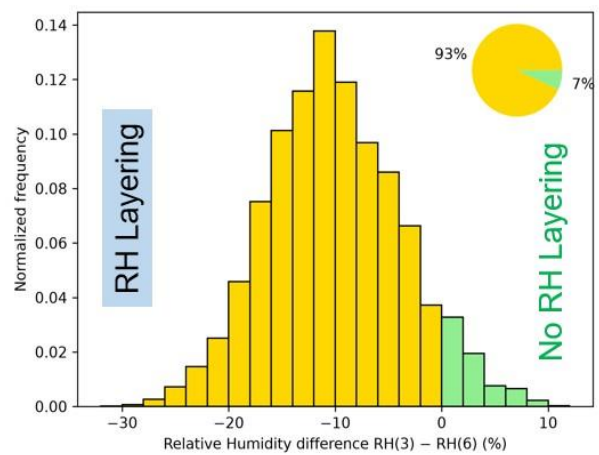
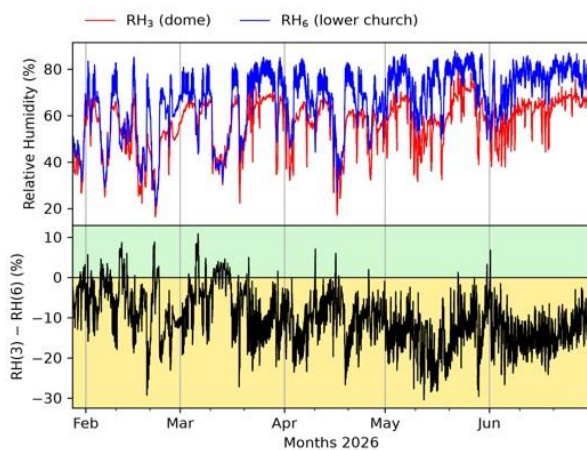
ფარდობითი ტენიანობა – შესასვლელი სივრცე (სენსორი 7)



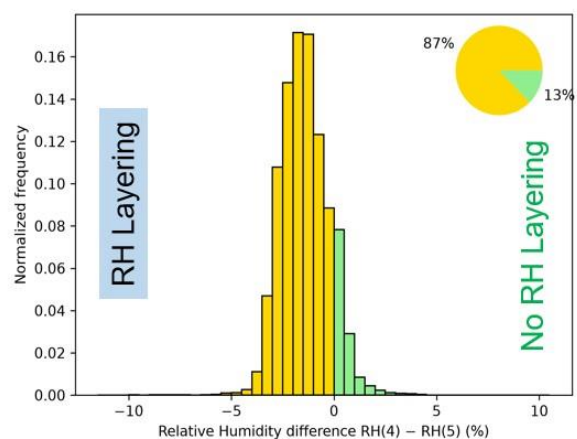
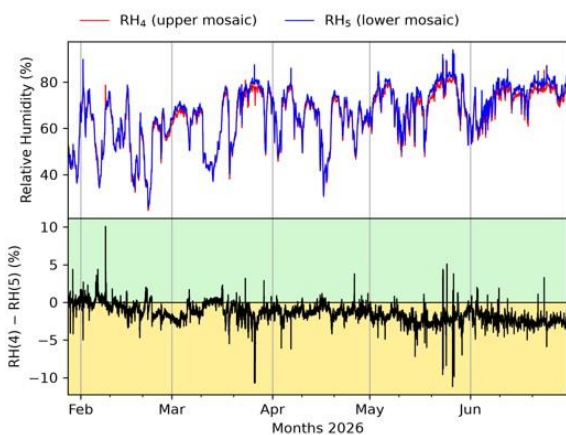
ყველა დონეზე, ყველაზე ტენიანი პირობები (RH-ის თვალსაზრისით) უფრო დაბალია გარე მაჩვენებლებზე, თუმცა მაქსიმალური მნიშვნელობები სიმაღლის მატებასთან ერთად იკლებს. ტენიანობის მერყეობის დიაპაზონი შესასვლელ სივრცეში (RH7) შეადგენს 20–95%-ს; ტაძრის ქვედა დონეზე (RH6) — 20–90%-ს; მოზაიკის ქვედა დონეზე (RH5) — დაახლოებით 25–85%-ს; მოზაიკის ზედა დონეზე (RH4) — 25–85%-ს, ხოლო გუმბათის სივრცეში (RH3) — 15–80%-ს.

სიხშირის განაწილება აჩვენებს პროგრესულ გადანაცვლებას უფრო მაღალი RH მნიშვნელობებისკენ ქვედა ღონეებზე, განსაკუთრებით შესასვლელ სივრცესა და იატაკთან ახლოს. პირიქით, გუმბათი ხასიათდება უფრო დაბალი RH-ით - სისტემატურად მისი უფრო მაღალი ჰაერის ტემპერატურის გამო.

ფარდობითი ტენიანობის სტრატეფიკაცია – გუმბათი (3) ტაძრის ქვედა ღონესთან მიმართებაში (6)



ფარდობითი ტენიანობის სტრატეფიკაცია – მოზაიკა

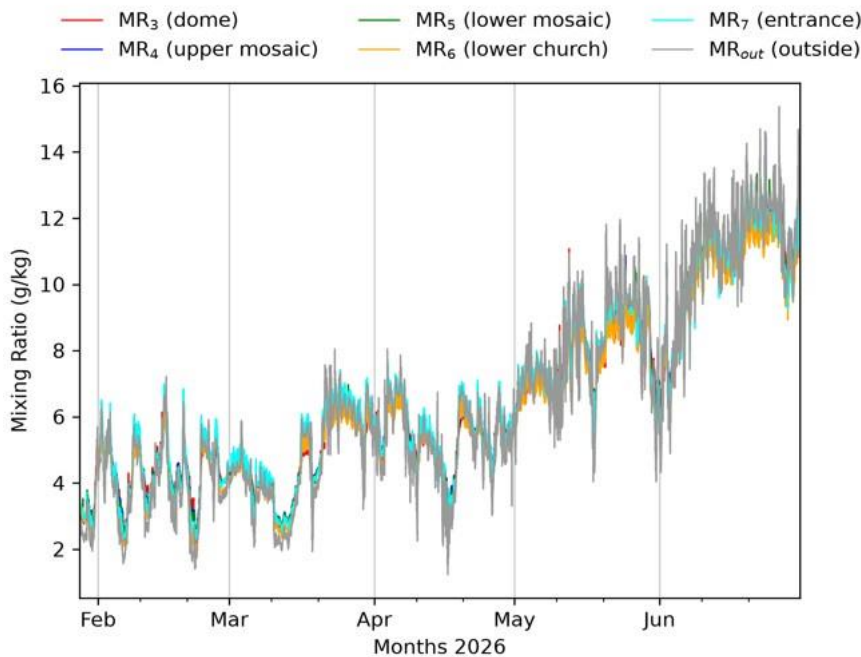


თუ გავითვალისწინებთ, რომ ტენშემცველობა (MR) ვერტიკალის გასწვრივ ჰომოგენურად არის განაწილებული, სიმაღლის მატებასთან ერთად ფარდობითი ტენიანობის (RH) კლება მკაცრად არის განპირობებული ტემპერატურის მატებით. ტემპერატურული სტრატეფიკაცია განაპირობებს ფარდობითი ტენიანობის (RH) ხილულ დაშრევებას.

ყველა დონეზე, ყველაზე მშრალი პირობების დროსაც კი, შიდა ფარდობითი ტენიანობა (RH) დაახლოებით 10%-ით მეტია გარე მაჩვენებელზე.

შერევის კოეფიციენტი

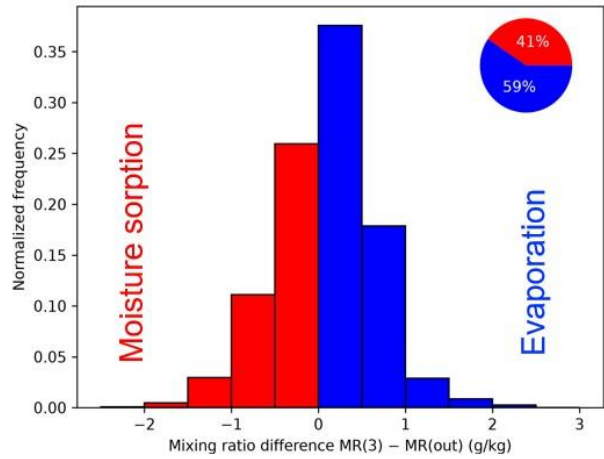
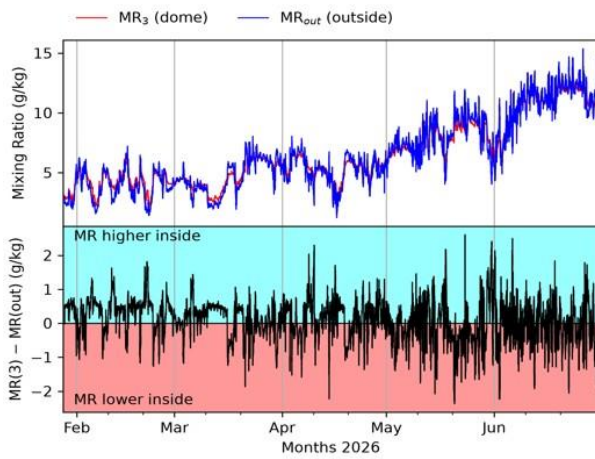
შერევის კოეფიციენტი – ყველა სენსორი



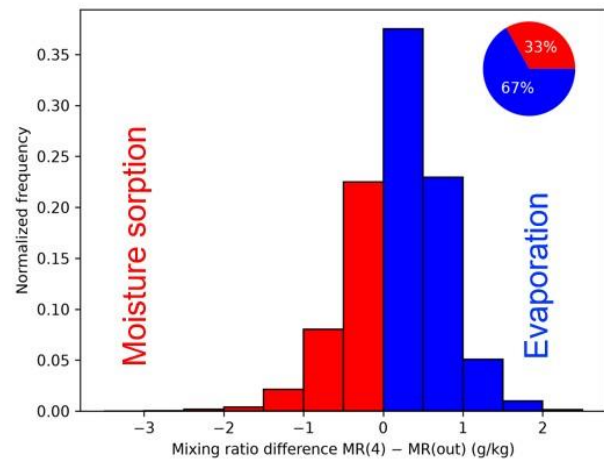
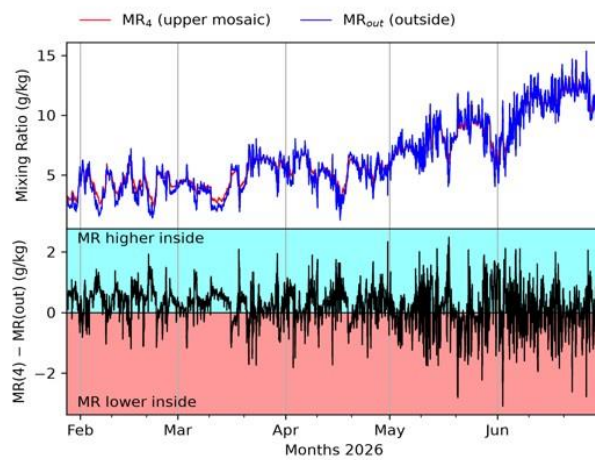
ყველა სენსორი აჩვენებს ტენშემცველობის (MR) ერთმანეთთან მჭიდროდ დაკავშირებულ მნიშვნელობებს, გარდატეხის (ექსტრემუმის) საერთო წერტილებითა და ტენდენციებით, თუმცა ოდნავ განსხვავებული მაჩვენებლებით, სადაც მათ შორის სხვაობა დაახლოებით 1 გ/კგ-ს შეადგენს.

შერევის კოეფიციენტი– გუმბათი (სენსორი 3)



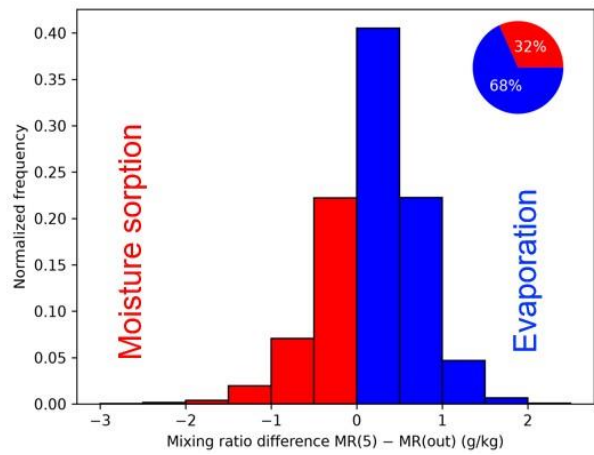
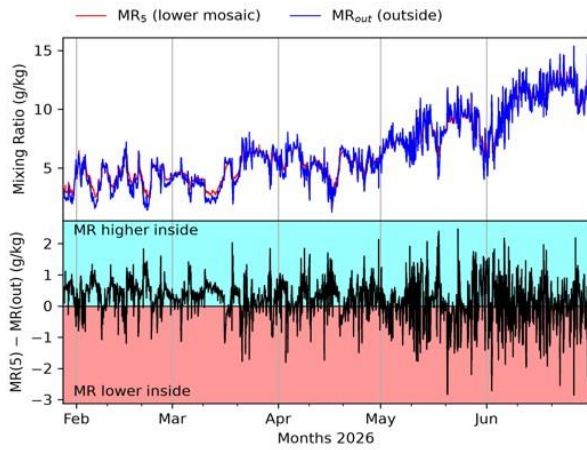


შერევის კოეფიციენტი – მოზაიკა (სენსორი 4)

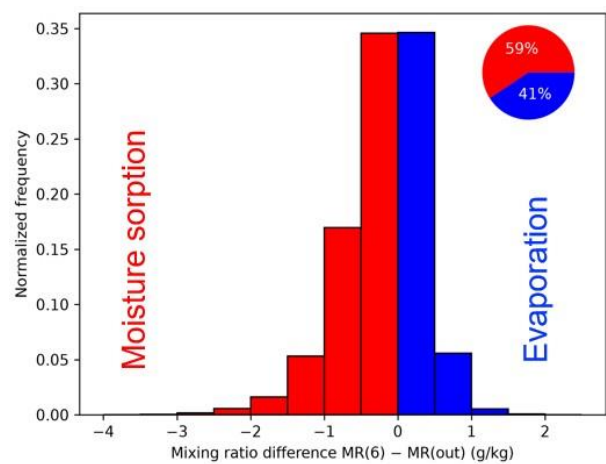
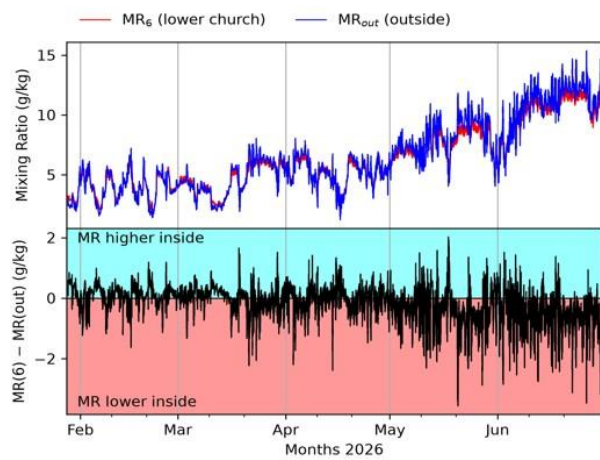


შერევის კოეფიციენტი – მოზაიკა (სენსორი 5)



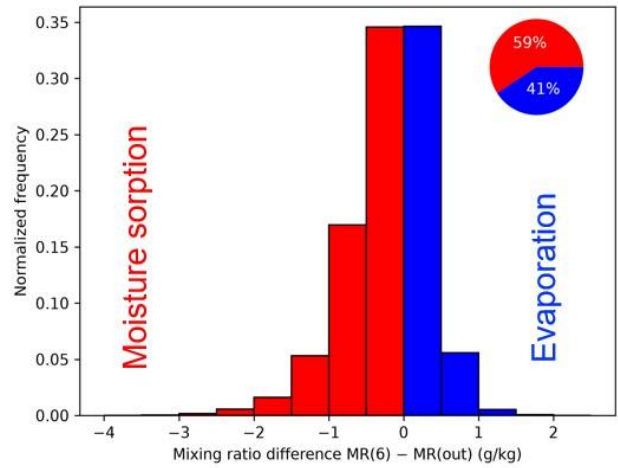
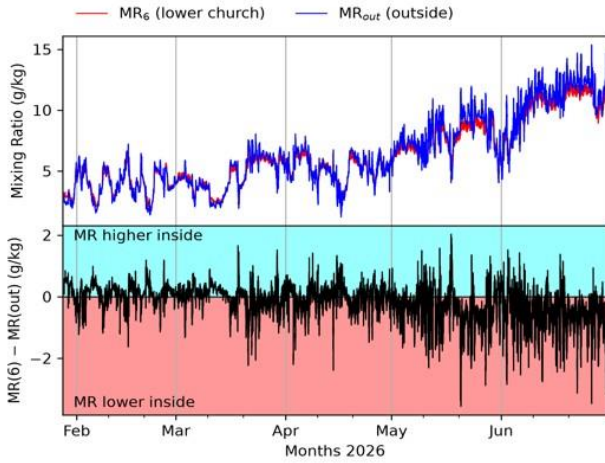


შერევის კოეფიციენტი – ტაძრის ქვედა დონე (სენსორი 6)



შერევის კოეფიციენტი – შესასვლელი სივრცე (სენსორი 7)





გუმბათზე წარმოებული შიდა გაზომვები (MR3) აჩვენებს გარე სენსორის (MR_{out}) მახასიათებლებთან მიახლოებულ მნიშვნელობებს, თუმცა გარკვეული მცირე განსხვავებებით: დროის 59%-ში შიდა მაჩვენებელი ოდნავ უფრო მაღალია (რაც შესაძლოა აიხსნას შიდა სივრცეში მიმდინარე გარკვეული აორთქლებით), ხოლო დროის 41%-ში — ოდნავ უფრო დაბალი (რაც შესაძლოა განპირობებული იყოს შიდა სივრცეში მიმდინარე ტენის სორბციით ან კონდენსაციით).

იღენტური მდგომარეობა ფიქსირდება სხვა საზომ წერტილებშიც, გარდა ტაძრის ქვედა დონისა (MR_6), სადაც 2026 წლის მაისში შეინიშნება ტენის სორბციის ან შესაძლო კონდენსაციის დროებითი, მცირე ტენდენცია, რაც, სავარაუდოდ, გამოწვეულია შიდა სივრცეში განხორციელებული გარკვეული აქტივობებით.

როგორც მოგვიანებით ვნახავთ ზედაპირის ტემპერატურისა და ნამის წერტილის კომბინირებული ანალიზის საფუძველზე, მოზაიკასა და კედლებზე კონდენსაციის წარმოქმნა გამორიცხულია, ხოლო ფიზიკური მექანიზმი განპირობებულია ქვის წყობის (კედლის) მიერ ტენის შთანთქმით შიდა მიკროფორებში (კელვინის ეფექტი) და ჰიგროფილური (ტენშემცველი) მასალებით.

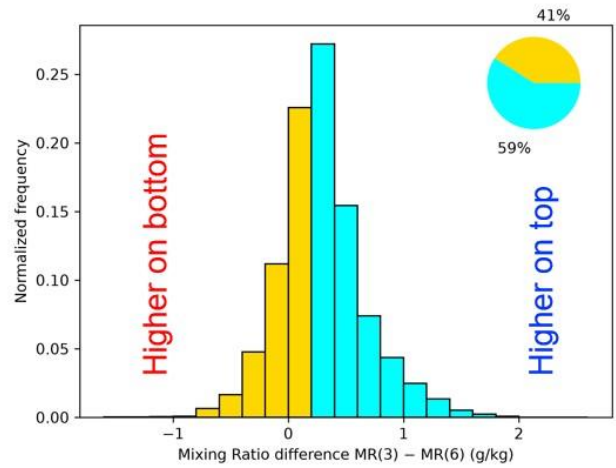
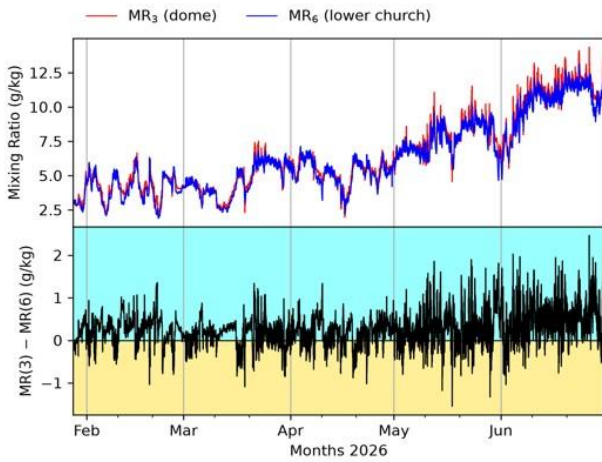
სხვაობები $\pm 1\text{g/kg}$ -ის ფარგლებში, იქნება ეს დადებითი თუ უარყოფითი, ახლოს არის გაანგარიშებაში მონაწილე ოთხივე სენსორის კომბინირებული ცდომილების ზღვართან და არ გააჩნია სტატისტიკურად მნიშვნელოვანი დონე.

2026 წლის მდგომარეობა აჩვენებს არსებით გაუმჯობესებას 2024 და 2025 წლების ვითარებასთან შედარებით, როდესაც დროის 90%-ზე მეტ მონაკვეთში დადებითი მნიშვნელობები აღემატებოდა უარყოფითს, ხოლო სხვაობები საგრძნობი იყო და 4 g/kg -ს აღწევდა. 2024–2025 წლებში აორთქლების პროცესი დომინირებდა, ახლა კი ქვის წყობამ (კედელმა) ბევრად უკეთეს წონასწორობას (ეკვილიბრიუმს) მიაღწია.

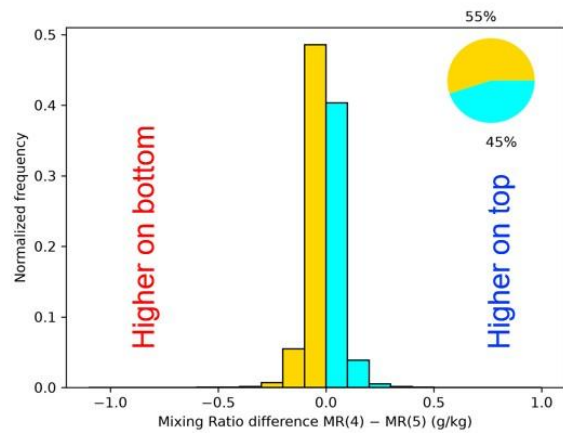
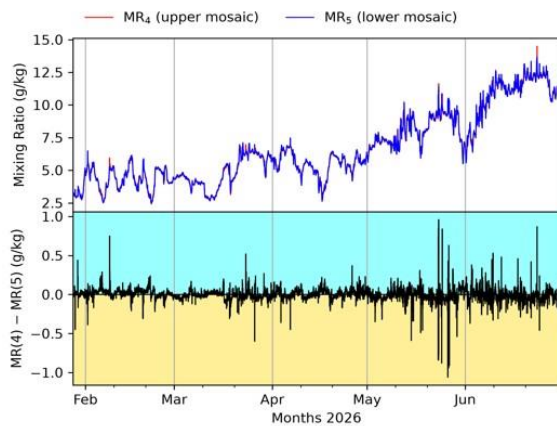
ცალკეული ჰისტოგრამები ნულის გარშემო კონცენტრირებული (ცენტრირებული), რაც ადასტურებს, რომ შიდა და გარე სივრცეებს შორის ტენიანობის სხვაობა ზოგადად მცირეა. მონაცვლეობითი დადებითი და უარყოფითი სექტორები აღწერს მცირე აორთქლებისა და ტენის მცირე შთანთქმის მომდევნო (მიმდევრობით) პერიოდებს და არა უწყვეტ, ერთმიმართულებიან ტენის ნაკადს.

ტენშემცველობის (MR) სტრატეგიკაცია–გუმბათი (3) ტაძრის ქვედა დონესთან მიმართებით (6)





ტენზომეტრების (MR) სტრატეგია– მოზაიკა



წყლის ორთქლის მოლეკულების მაღალი დიფუზიურობისა (შეღწევადობის) და შიდა მექანიზმების ნელი დინამიკის გამო, ტენზომეტრება (MR) საკმაოდ ჰომოგენურად არის განაწილებული ვერტიკალზე. რაიმე მნიშვნელოვანი დაშრევა (სტრატეგია) არ დაფიქსირებულა.

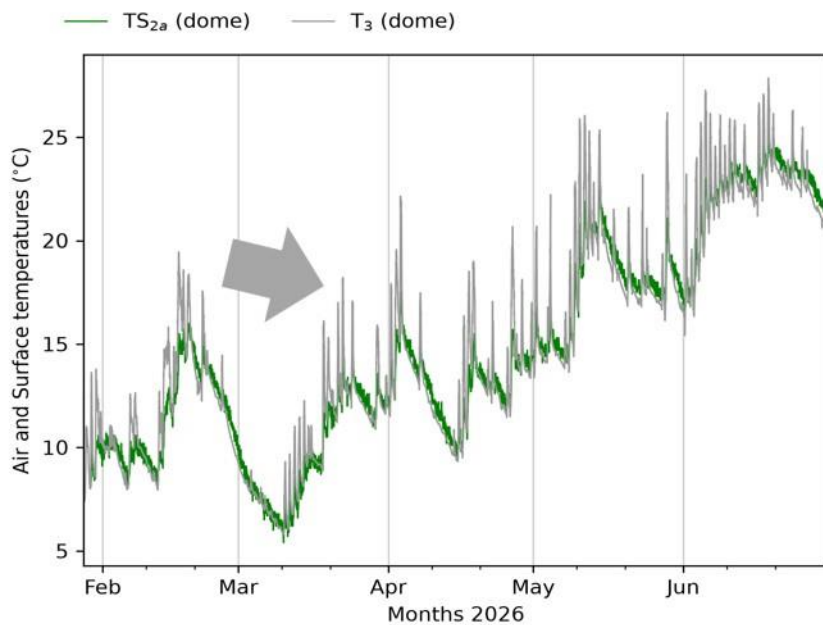
ზედაპირისა და ჰაერის ტემპერატურები

გუმბათი – ზედაპირისა და ჰაერის ტემპერატურა



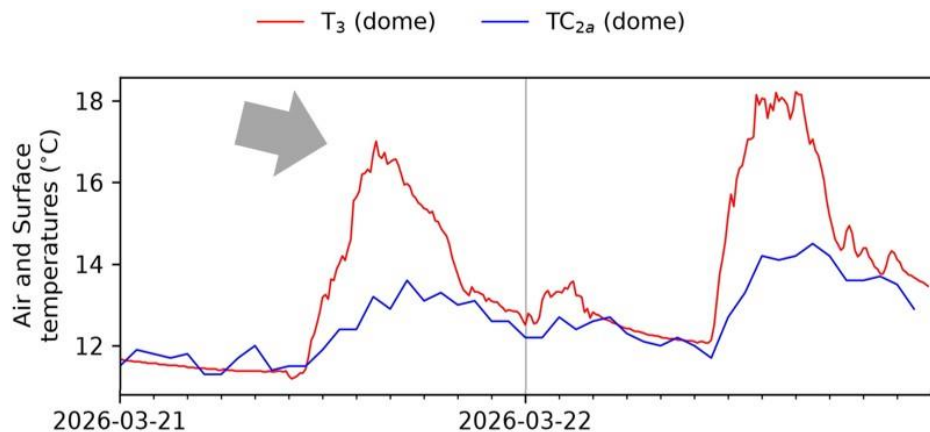
თბილისი ჰაერის შემოდინება

Warm Air Inflows



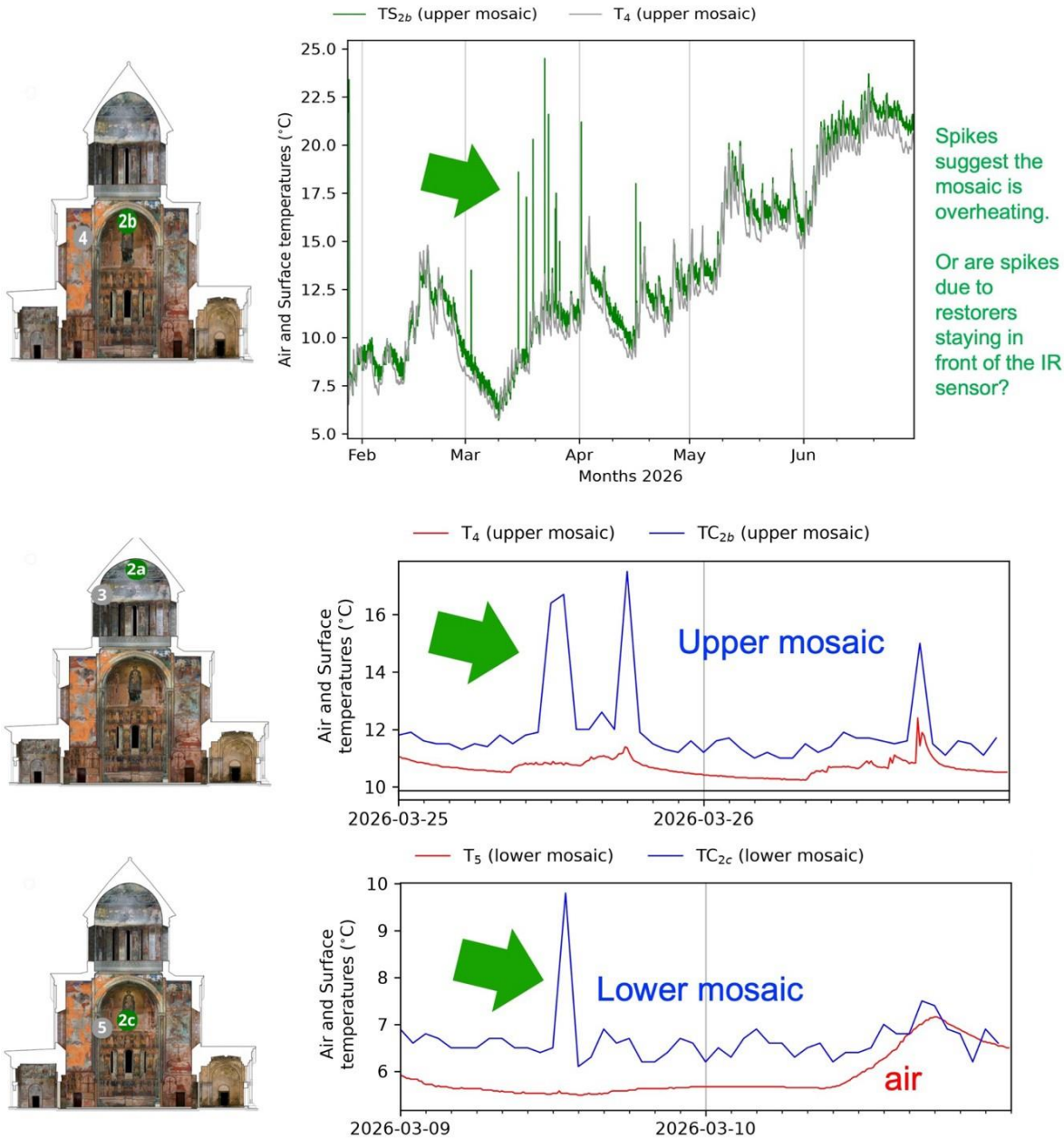
თბილისი ჰაერის შემოდინება

Warm Air Inflows



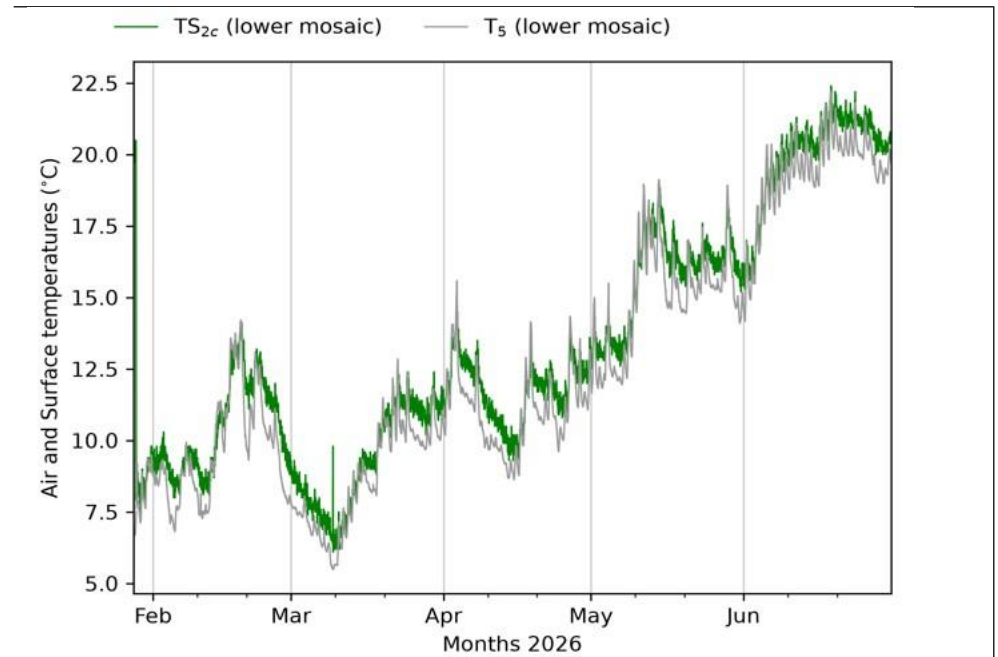
თბილისი ჰაერი გუმბათში სარკმელებიდან შედის. დღის განმავლობაში ეს ჰაერი (წითელი მრუდი) ბევრად უფრო თბილია, ვიდრე გუმბათის ზედაპირის ტემპერატურა. ღამის განმავლობაში ჰაერი და გუმბათი ერთსა და იმავე ტემპერატურას აღწევს.

მოზაიკა – ჰაერისა და ზედაპირის ტემპერატურები



შეინიშნება ტემპერატურის რამდენიმე პიკი, რომლებიც $10^{\circ}C$ -ს აღწევს, თუმცა ჰაერზე ეს გავლენას არ ახდენს. ეს ნიშნავს, რომ სითბო არის რადიაციული (გამოსხივებადი), მაგალითად, ინფრაწითელი (IR) გამოსხივება. ჩნდება კითხვა: არის თუ არა ეს გადახურება რეალური? არის თუ არა ეს გამოწვეული მზის რადიაციით ან ჰალოგენური ნათურებით? თუ ეს პიკები განპირობებულია რესტავრატორებით, რომლებმაც ჩაუარეს ინფრაწითელ სენსორს და სენსორმა დააფიქსირა (ჩაწერა) მათი სითბური ნაკადი?

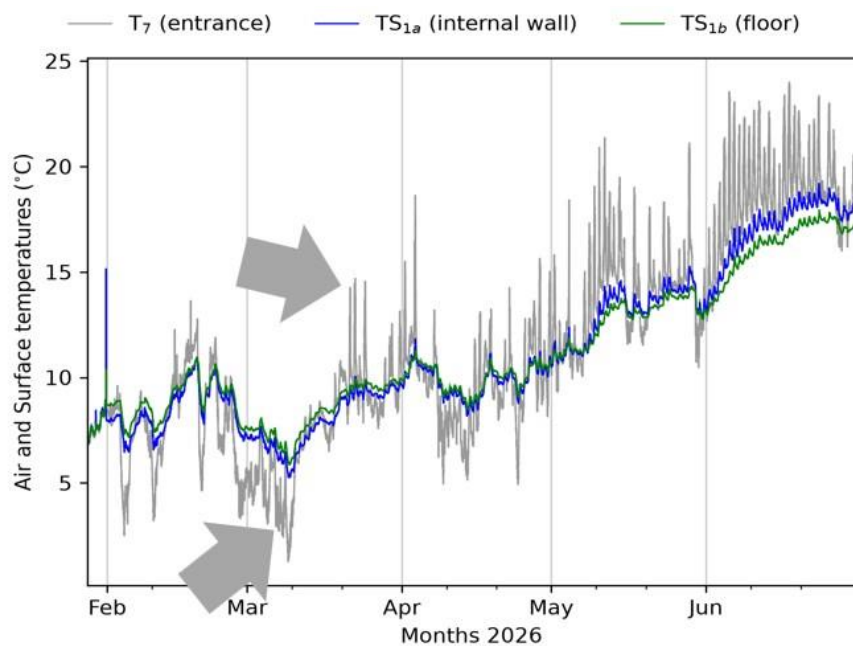
მოზაიკა (ქვედა დონე) – ჰაერისა და ზედაპირის ტემპერატურები



შესასვლელი სივრცე და იატაკის დონის ჰაერი და ზედაპირი



Cold and Warm
Air Inflows



(ცივი და თბილი ჰაერის ნაკადების შემოდინება)

დროის უმეტეს ნაწილში მოზაიკის ან ქვის წყობის (კედლის) ტემპერატურა ყოველთვის ახლოს არის შიდა ჰაერის ტემპერატურასთან და ისინი თითქმის ემთხვევა ერთმანეთს 1°C -ის ფარგლებში. მიუხედავად ამისა, შეინიშნება რამდენიმე მკვეთრი პიკი, თუმცა მათ სრულიად განსხვავებული ბუნება აქვთ.

გუმბათზე ეს პიკები ხშირია და განპირობებულია თბილი ჰაერით (მაგალითად, ფანჯრებიდან შემავალი თბილი ჰაერის ნაკადებით?).

მოზაიკის ზედა ღონეზე 10°C -მდე გადახურება ძირითადად მარტის მეორე ნახევარში ფიქსირდება, თუმცა, გადახურება ეხება თავად მოზაიკას (და არა ჰაერს, როგორც გუმბათის შემთხვევაში) და ეს შეიძლება აიხსნას შიგნით მიმდინარე აქტივობებით (რესტავრაციორების მუშაობა, ჰალოგენური ნათურების გამოყენება). ადგილობრივ პერსონალს ეძლევა რეკომენდაცია, გააკონტროლონ პროცესები რათა თავიდან აიცილონ ხელსაწყოების მუშაობაში ჩარევა/ხელის შეშლა.

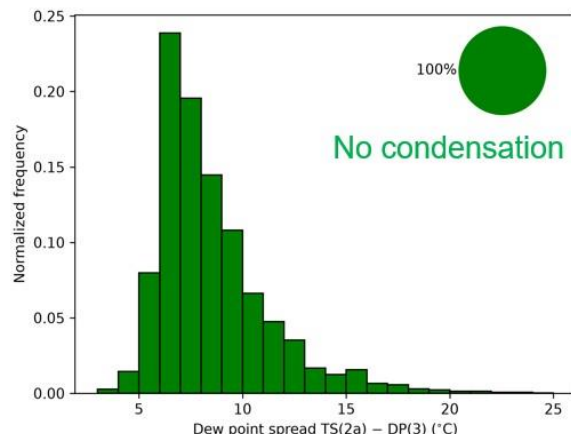
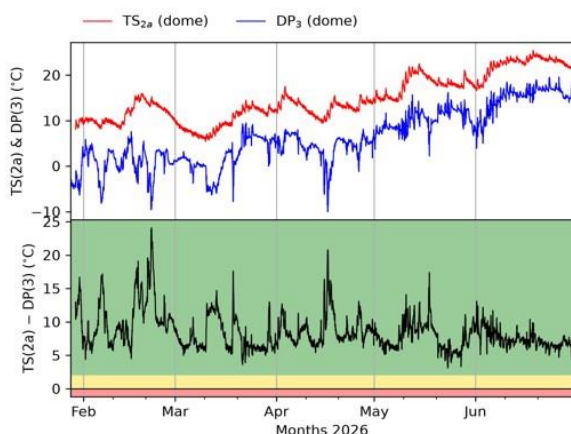
მოზაიკის ქვედა ღონეზე მდგომარეობა დამაკმაყოფილებელია, ხელსაწყოების მუშაობაში გარე ჩარევის მხოლოდ ერთი შემთხვევა აღინიშნა.

შესასვლელი სივრცის ქვის წყობასა და იატაკზე ტემპერატურა იცვლება ზემოთ უკვე განხილული ღონეების მსგავსად, თუმცა აქ ფიქსირდება საგრძნობი გადახრები 5°C -მდე — როგორც დადებითი, ისე უარყოფითი მიმართულებით. ეს, სავარაუდოდ, გამოწვეულია კარებიდან გარე ჰაერის მუდმივი (ინტენსიური) ინფილტრაციით (შედწევით), რომელიც დღისით უფრო თბილია, ხოლო ღამით — უფრო ცივი.

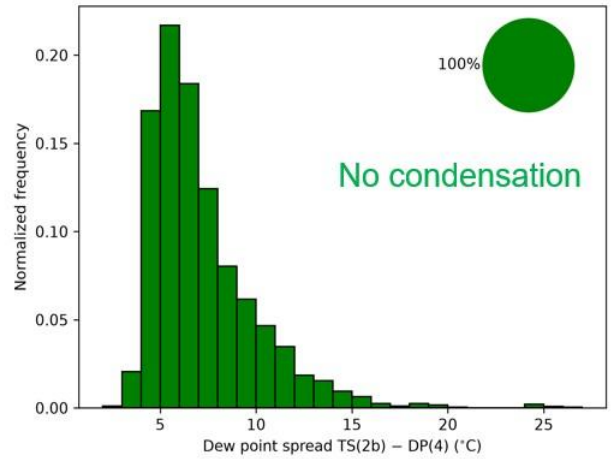
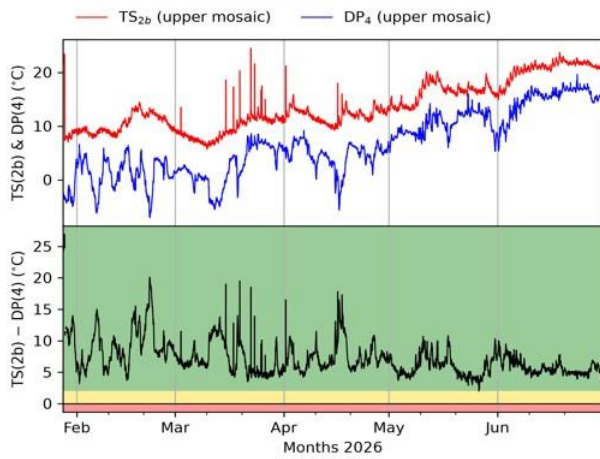
ამრიგად, ჰაერისა და ზედაპირის ტემპერატურებს შორის შედარება საშუალებას იძლევა, ერთმანეთისგან გაიმიჯნოს შენობის კონსტრუქციის (მასალის) რეალური თერმული რეაქციები გარეშე ხელშემშლელი ფაქტორებისგან (ანომალიებისგან). ნელა ცვალებადი, ერთმანეთთან მჭიდროდ დაკავშირებული მრუდები ასახავს ნორმალურ სითბოცვლას, მაშინ როდესაც მკვეთრი და ხანმოკლე გადახრები (დისბალანსი) მიუთითებს ლოკალური ჰაერის ნაკადების შემოდინებაზე, გამოსხივების წყაროებზე, სიახლოვეს მიმდინარე აქტივობებზე ან ხელსაწყოების მუშაობაში დროებით ჩარევაზე.

ნამის წერტილი და კონდენსაცია

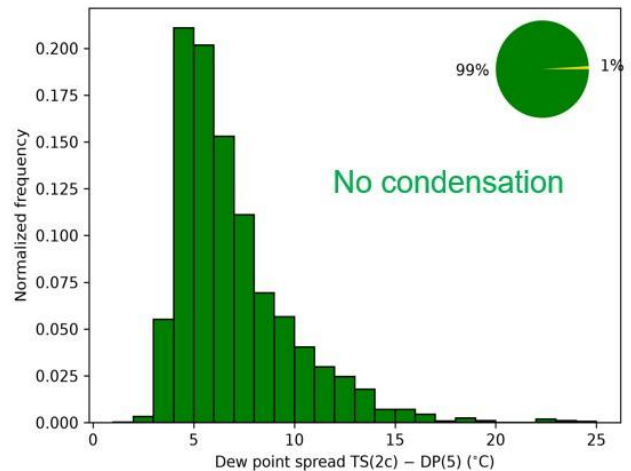
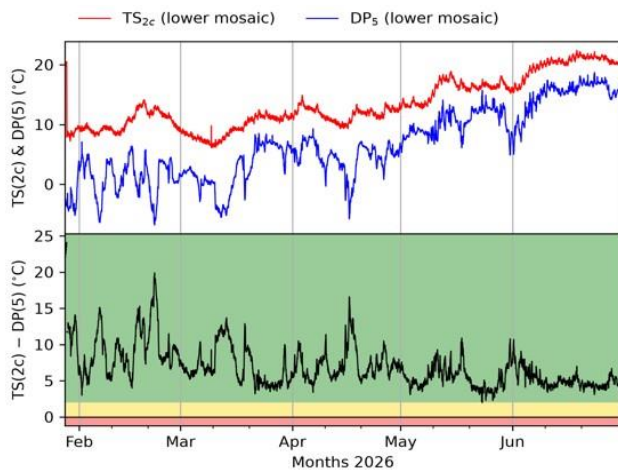
გუმბათი – კონდენსაცია



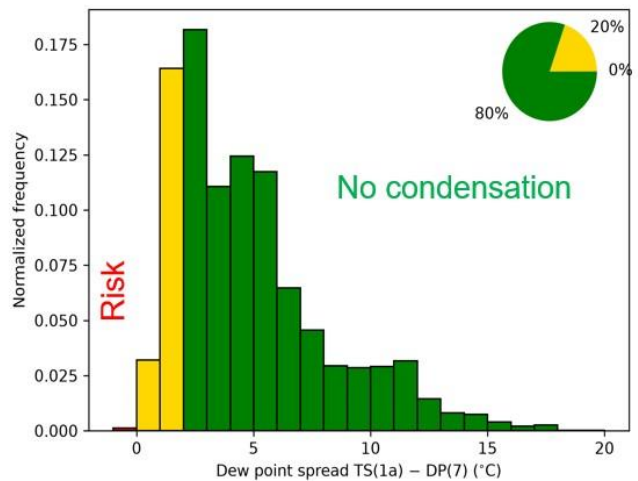
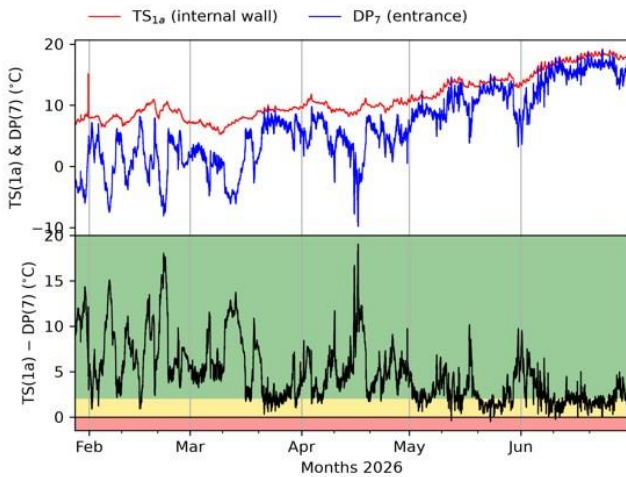
მოზაიკა (ზედა ღონე) – კონდენსაცია



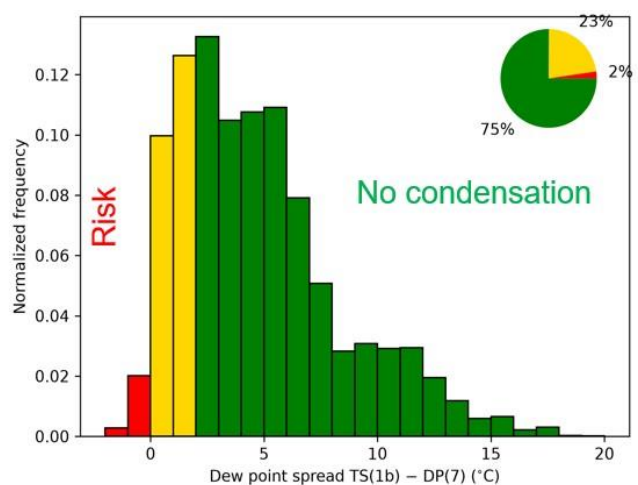
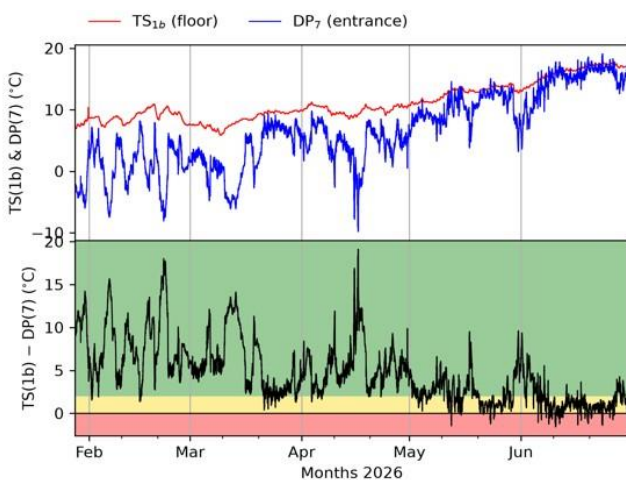
მოზაიკა (ქვედა ღონე) – კონდენსაცია



შესასვლელი სივრცის კონდენსაცია



იატაკის ღონის კონდენსაცია



უნდა გვახსოვდეს, რომ კონდენსაცია მხოლოდ მაშინ ხდება, როდესაც ზედაპირის ტემპერატურა (TS) ჰაერის ნამის წერტილზე (DP) დაბლა ეცემა. სხვაობას TS-სა – DP-ს შორის, ეწოდება ნამის წერტილის

დეფიციტი (DPS). როდესაც DPS დადებითია, კონდენსაცია შეუძლებელია. როდესაც DPS უარყოფითია, ხდება კონდენსაცია. ხოლო როდესაც $TS = DP$, ან მასთან ახლოსაა, ადგილი აქვს წონასწორობას (მაგალითად, აორთქლება კონდენსაციის ტოლია), ან მიღებულ მაჩვენებელს არ გააჩნია არსებითი მნიშვნელობა, ვინაიდან იგი ახლოს არის ხელსაწყობის ცდომილების ზღვართან

გუმბათის, მოზაიკის ზედა და ქვედა დონეების ტემპერატურა მუდმივად (დროის 100%-ში) აღემატება ჰაერის ნამის წერტილს, რაც სრულიად გამორიცხავს კონდენსაციის წარმოქმნას.

იატაკის დონეზე, გარე ჰაერის ხშირი და მასიური შემოდინების გამო, შესასვლელი სივრცის კედლისა და იატაკის ტემპერატურა დროის 20–25%-ში აღწევს კონდენსაციის რისკის ზღვარს.

უნდა დაზუსტდეს, რომ განხილული ტემპერატურის მაჩვენებლები უახლოვდება ნამის წერტილს, თუმცა მათ არასოდეს დაცემულა საგრძნობლად ნამის წერტილზე დაბლა. სხვა სიტყვებით რომ ვთქვათ, იატაკი და კედლის ქვედა ნაწილი პოტენციურად დგას ზედაპირული კონდენსაციის საფრთხის წინაშე. ეს მოვლენები განსაკუთრებით ივნისში დაფიქსირდა და, სავარაუდოდ, კიდევ დაახლოებით ერთი თვის განმავლობაში გაგრძელდება.

5. დასკვნები 2026 წლის პირველი ნახევრის მონიტორინგის შესახებ

2026 წლის პირველ ნახევარში, ისევე როგორც წინა წლებში (ე.ი. 2024 და 2025 წლებში), არც მოზაიკას და არც ქვის წყობას არ განუცდია კონდენსაცია, რადგან კედლის ზედაპირის ტემპერატურა ყოველთვის აღემატებოდა ჰაერის ნამის წერტილს. მხოლოდ იატაკზე დაფიქსირდა გარკვეული კონდენსაცია გვიანი გაზაფხულიდან.

წინა წლებთან შედარებით, შობის ტაძარმა უკეთეს წონასწორობას მიაღწია.

აორთქლების პროცესი (რაც გამოიხატება შიდა ტენშემცველობის MR-ის სიჭარბით გარე მაჩვენებელთან შედარებით) აღარ არის ისეთი მკვეთრად დომინანტური, როგორც ეს ადრე იყო (დროის 93–94%-ში). მან საგრძნობლად დაიკლო და შეადგენს 59%-ს გუმბათზე, 67–68%-ს მოზაიკის დონეზე და 41%-ს ტაძრის ქვედა ნაწილში, ხოლო შესასვლელ სივრცეში კვლავ მაღალ ნიშნულზე — 74%-ზე რჩება. სრული წონასწორობა მიიღწევა მაშინ, როდესაც დადებითი გადახრები (აორთქლება) გაუტოლდება უარყოფითს (ტენის სორბციას), ანუ თანაფარდობა იქნება 50/50%-ზე. გარდა ამისა, თუ გასულ წლებში შიდა და გარე მაჩვენებლებს შორის სხვაობა ზაფხულში 4–5 გ/კგ-ს აღწევდა, ახლა ეს მაჩვენებელი მხოლოდ დაახლოებით 1 გ/კგ-ის ფარგლებშია.

ეს მიგნება მიუთითებს იმაზე, რომ გარედან წყლის შემოტანის (შედწევის) პროცესი, რომელიც აქამდე ასველებდა (ჟდინთავდა) გადახურვასა და კედლებს, მნიშვნელოვნად შემცირდა ან სრულიად შეწყდა. აღნიშნული ფუნდამენტური საკითხი საბოლოოდ დაზუსტდება მომდევნო გაზომვების საფუძველზე.

შენობის, და განსაკუთრებით იატაკის, თერმული ინერციის გამო, ზოგადად გაზაფხულსა და ზაფხულის დასაწყისში შესაძლოა წარმოიქმნას კონდენსაცია შედარებით ცივ ზედაპირებზე. კონდენსაციის რისკი განსაკუთრებით მაღალია იატაკზე და იგი დაფიქსირდა დროის 20–25%-ში მაისსა და განსაკუთრებით ივნისში. იატაკის ამგვარმა სინესტემ (დატენიანებამ) შესაძლოა ხელი შეუწყოს მიკრობიოლოგიურ კოლონიზაციასა და მავნებლების გავრცელებას (ინფესტაციას).

სასარგებლო იქნება იმის დაზუსტება, რომ როგორც კი კონდენსაციის შედეგად იატაკის ქვაზე თხევადი წყალი დაგროვდება, იგი, სავარაუდოდ, საკმაოდ ხანგრძლივი დროით შენარჩუნდება (და ვიზუალურად შესამჩნევი იქნება), ვინაიდან შიდა სივრცეში არსებული მაღალი ტენიანობის გამო აორთქლების პროცესი გართულებულია. უნდა გვახსოვდეს, რომ უშუალოდ კონდენსაციის (დანამვის) დრო აუცილებლად არ ემთხვევა იმ პერიოდს, რომლის განმავლობაშიც იატაკის სინესტე ვიზუალურად შესამჩნევია.

ტაძრის შესასვლელი სივრცე და იატაკი ყველაზე მეტად ექვემდებარება გარე ჰაერის ზემოქმედებას, რამაც მარტი-ივნისის პერიოდში, იატაკის თერმული ინერციისა და გარე ტენიანობის გამო, შესაძლოა კონდენსაცია გამოიწვიოს. 2026 წლის მდგომარეობა გაუარესებულია, რადგან გარე დამცავი საფარის გამო 2025 წელს შენობამ მზის სითბო ვერ დააგროვა, რამაც სტრუქტურის გადაციება და კონდენსაციის რისკი გაზარდა. ადრეული ზაფხულის იატაკის კონდენსაცია გელათის კლიმატში შენობის ბუნებრივი რეაქციაა და არა ანომალია. 2025 წლის ანგარიში ადასტურებს, რომ მსგავსი პროცესი ჩრდილო-დასავლეთ ეგვტერში მაისიდან აღინიშნებოდა.

ტაძრის ადრეული ფოტოები მოწმობს, რომ კედლების ქვედა ნაწილი სინესტისგან ძლიერ იყო დაზიანებული, რაც მიუთითებს იმაზე, რომ დღევანდელი მდგომარეობა ბევრად არ განსხვავდება იმ ვითარებისგან, რომელშიც ნაგებობა საუკუნეების განმავლობაში იმყოფებოდა.

არ არის რეკომენდებული ვენტილაციის, გამათბობლების, ჰაერის გამომშრობლების ან სხვა მოწყობილობების ქაოტური და უკონტროლო გამოყენება, რამაც შესაძლოა მკვეთრად გააუარესოს არსებული მდგომარეობა.

მიუხედავად ამისა, შესაძლებელია განხორციელდეს გარკვეული სტრუქტურული ინტერვენციები, რათა შეიცვალოს გვიან გაზაფხულსა და ადრეულ ზაფხულში იატაკის კონდენსაციის ზემოაღნიშნული მახასიათებლები, რაც მეტად ტიპურია მასიური ნაგებობებისთვის და ფართოდ არის დოკუმენტირებული სამეცნიერო ლიტერატურაში.

შენობის საპასუხო რეაქციის ცვლილება დროთა განმავლობაში

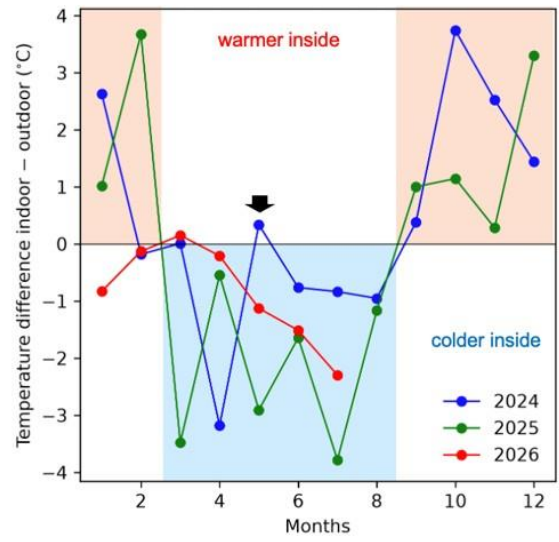
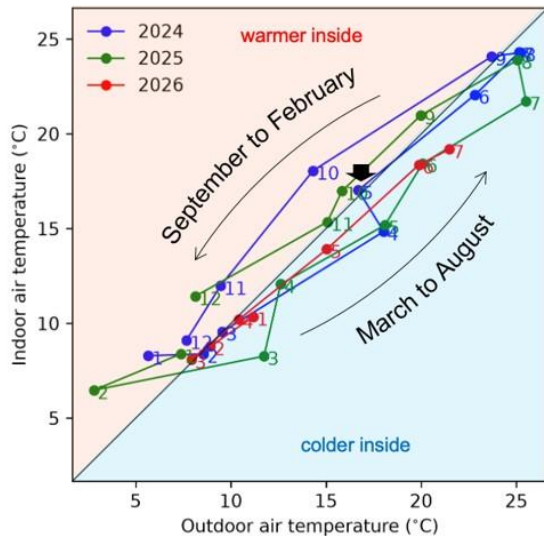
მომდევნო ორი სლaidი განმარტავს ღვთისმშობლის შობის ტაძრის შიდა ჰაერსა და ნაგებობის სტრუქტურას (მასალას) შორის არსებული ურთიერთქმედების ტრანსფორმაციას. განხილულია სამი წელი, თავისი შესაბამისი გარდამტეხი ეტაპებით: 2024 წელი: საწყისი წელი, რომელიც ხასიათდებოდა სახურავიდან წყლის ჩადინებითა (გაჟონვით) და ტაძრის შიგნით ინტენსიური აორთქლებით; 2025 წელი: ინტენსიური სამუშაოების წარმოებისა და გარე დამცავი საფარის მოწყობის წელი; სახურავიდან ჩადინება შეჩერდა; 2026 წელი: წელი, როდესაც შენობა დაუბრუნდა ნორმალურ მდგომარეობას; ჩადინება სრულიად ლიკვიდირებულია, თუმცა გამოვლინდა გვერდითი ეფექტი: იატაკის კონდენსაცია ზაფხულში. კომენტარები უნდა შემოიფარგლოს მხოლოდ შიდა და გარე ჰაერის ტემპერატურებითა და ტენზომეტრული მჩვენებლებით, ვინაიდან ადრეული მონიტორინგის სისტემაში კედლისა და იატაკის ტემპერატურები ადეკვატურად არ იყო გათვალისწინებული.

შიდა და გარე ჰაერის ტემპერატურების ცვლილების დინამიკა დროთა განმავლობაში

წარმოდგენილი ორივე დიაგრამა ასახავს ერთსა და იმავე ცვლადებს, თუმცა ოდნავ განსხვავებული ფორმით: კერძოდ, ასახავს შიდა და გარე ჰაერის ტემპერატურებს შორის არსებულ კავშირებს (თვითნებური საშუალო მჩვენებლების მიხედვით)

პირველი გრაფიკი: შიდა ჰაერის ტემპერატურა გარე ჰაერის ტემპერატურასთან მიმართებაში. ბისექტრისა ასახავს შიდა და გარე ჰაერის ტემპერატურების ტოლობას, ანუ მდგომარეობას, როდესაც კედლებიდან სითბოს არც გადაცემა მიღება და არც დაკარგვა. თვითნებური საშუალო მჩვენებლები მიჰყვება საათის ისრის საწინააღმდეგო მიმართულებით მოძრავ ელიფსს, ყველაზე დაბალი ექსტრემუმით იანვარ-თებერვალში, ხოლო მაქსიმუმით — აგვისტოში. ელიფსის მცირე ღერძის სიგანე ასახავს ნაგებობის სტრუქტურის თერმულ ინერციას. 2024 წელს ეს სიგანე ყველაზე დიდი იყო, როდესაც კედლები ჩვეულებრივად ექვემდებარებოდა ატმოსფერული ფაქტორების გავლენას. 2025 წელს იგი მკვეთრად შემცირდა გარე დამცავი საფარის მოწყობის გამო. 2024 წლის მაისში (შავი ისარი) დაფიქსირდა მოკლე ჩართვა (პირდაპირი კავშირი) გარე და შიდა სივრცეებს შორის, რაც, სავარაუდოდ, გამოწვეული იყო გარკვეული აქტივობებით, რომელთა დროსაც კარები ან სარკმლები ღია იყო. 2026 წელს წითელი მრუდი ბისექტრისასთან ახლოს დაიწყო, ვინაიდან 2025 წელს შენობამ ნაკლები მზის ენერგია შთანთქა (გარე დამცავი საფარის გამო). ამჟამად მდგომარეობა ეტაპობრივად უბრუნდება ნორმას, თუმცა, 2024 წლის საწყის საცნობარო მჩვენებელთან შედარებით, შეინიშნება დაახლოებით ერთთვიანი დაგვიანება.

მეორე გრაფიკი: აჩვენებს შიდა და გარე ჰაერის ტემპერატურებს შორის არსებულ სხვაობას კალენდარული წლის მიხედვით. არსებობს აშკარა მტკიცებულება იმისა, რომ ღვთისმშობლის შობის სახელობის ტაძრის შიდა ჰაერი უფრო ცივია მარტიდან აგვისტოს ჩათვლით, ხოლო წლის დარჩენილ პერიოდში — პირიქით. თბილ სეზონზე დაგროვილი სითბო ფუნდამენტურია კედლების ტემპერატურის რეგულირებისთვის: თბილი კედლები ამცირებს კონდენსაციის რისკს, ხოლო ცივი კედლები ზრდის კონდენსაციის ალბათობას. გრაფიკზე დაკვირვებით, ზოგადად, 2024 წლის ზაფხულში შიდა და გარე ტემპერატურებს შორის მცირე სხვაობა იყო, ხოლო 2025 წლის ზაფხულში შიდა სივრცის გაგრილება (გარე ტემპერატურასთან მიმართებით) კიდევ 2-3°C-ით გაიზარდა. ნაგებობის სტრუქტურის მიერ სითბოს ამგვარ ნაკლებ დაგროვებას, სავარაუდოდ, ექნება გავლენა 2026 წელზე. თუმცა, შემცირებული ენერგეტიკული ბალანსის ეს „მეხსიერება“ დროთა განმავლობაში გაქრება. 2026 წელი შედარებით ცივად დაიწყო და ამჟამად მიმდინარეობს შუალედურ პოზიციაზე — 2024 წლის საწყის საორიენტაციო მჩვენებელსა და 2025 წლის დამცავი საფარით იზოლირებულ წელს შორის.

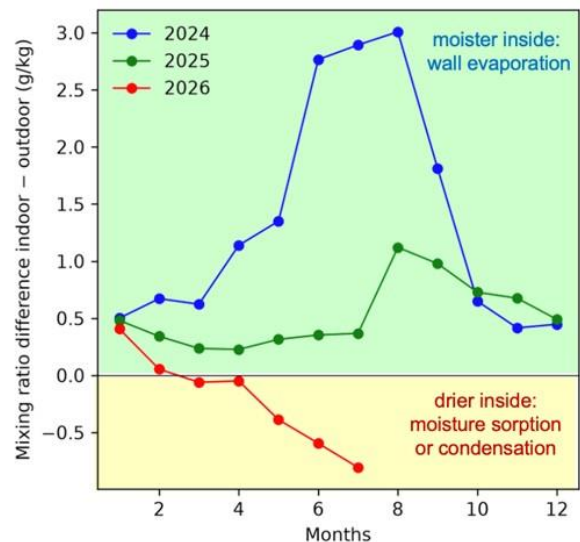
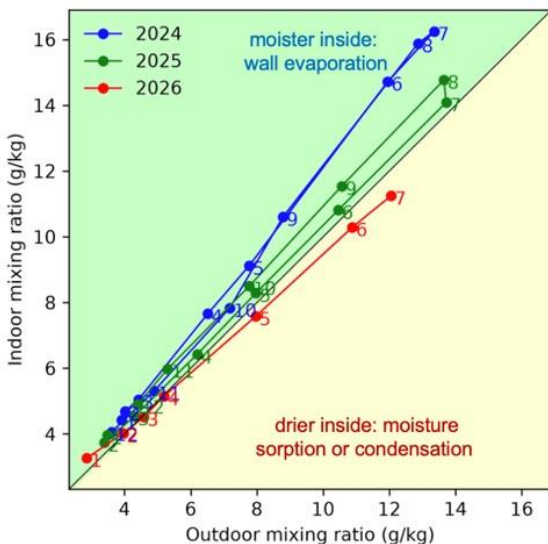


შიდა აორთქლება, ტენის შთანთქმა, კონდენსაცია

ორივე დიაგრამა (გრაფიკი) ასახავს ერთსა და იმავე ცვლადებს, თუმცა წარმოდგენილია ოდნავ განსხვავებული ფორმით: კერძოდ, შიდა და გარე ტენშემცველობას (MR) შორის არსებულ კავშირებს (თვიური საშუალო მაჩვენებლების მიხედვით).

პირველი გრაფიკი: შიდა ტენშემცველობა გარე ტენშემცველობასთან მიმართებაში. ბისექტრისა ასახავს შიდა და გარე ტენშემცველობის ტოლობას, ანუ მდგომარეობას, როდესაც ჰაერსა და კედლებს შორის ტენის არც გადაცემა ხდება და არც დაკარგვა. ჰაერი კედლებიდან ტენს აორთქლების გზით იღებს, ხოლო კედლის მიერ შთანთქმის (სორბციის) ან კონდენსაციის შედეგად — კარგავს. 2024 წელი, ბისექტრისიდან ყველაზე მეტად გადახრილი წელია, რაც აჩვენებს, რომ ამ პერიოდში ჰაერმა კედლებიდან დიდი რაოდენობით ტენი მიიღო. ეს აიხსნება კედლებზე არსებული დიფუზური (გაფანტული) სინესტიით, რაც გამოწვეული იყო სახურავიდან წყლის ჩადინებით. 2025 წელს გარე დამცავი საფარის მოწყობამ შეაჩერა ჩაჟონვა, რის შედეგადაც აორთქლება მკვეთრად შემცირდა და მიუახლოვდა ბისექტრისით გამოსახულ წონასწორობას (ანუ აორთქლება = სორბციას). 2026 წელს კი სრულიად საპირისპირო მდგომარეობა დაფიქსირდა: გამოიკვეთა ჰაერიდან ტენის ინტენსიური მოცილების დომინირება, რაც განპირობებული იყო როგორც კედლების მიერ ტენის შთანთქმით, ისე იატაკის კონდენსაციით, სადაც ეს უკანასკნელი ყველაზე თბილ თვეებში ვლინდება.

მეორე გრაფიკი: შიდა და გარე ტენშემცველობას (MR) შორის არსებული სხვაობა კალენდარული წლის მიხედვით. პირველი წელი, 2024, რომელიც ხასიათდებოდა სახურავიდან წყლის ჩადინებით, აჩვენებს შთამბეჭდავ (მასიურ) აორთქლებას, განსაკუთრებით ზაფხულის თვეებში, როდესაც ჰაერი თბილია და შეუძლია წყლის მოლეკულების დიდი რაოდენობის შეკავება. ოქტომბერში აორთქლების პროცესი მკვეთრად იკლებს, რაც განპირობებულია ტემპერატურის დაწევითა და ჰაერის მიერ წყლის მოლეკულების შეკავების უნარის შემცირებით. 2025 წელს ჩაჟონვის შეჩერებამ და შიდა სივრცეში ტემპერატურის კლებამ მნიშვნელოვნად შეამცირა შიდა აორთქლება. 2026 წლის თებერვალი, მარტი და აპრილი დაიწყო კარგად დაბალანსებული წონასწორობით, რის შემდეგაც პროცესი გადავიდა ჰაერში ტენის შემცველობის შემცირებაზე — როგორც კედლების მიერ ტენის შთანთქმის (სორბციის), ისე ცივ იატაკზე კონდენსაციის ხარჯზე. ეს უკანასკნელი (იატაკის კონდენსაცია) ოფიციალურად დადასტურდა მონიტორინგის სისტემის მიერ.



მსჯელობა იატაკის კონდენსაციასა და კონსერვაციულ გათბობაზე

იატაკის ან კედლის კონდენსაცია ტიპური მოვლენაა მასიური ნაგებობებისთვის, განსაკუთრებით გვიან გაზაფხულსა და ადრეულ ზაფხულში, რაც განპირობებულია კონსტრუქციების თერმული ინერციითა და ჰაერში ტენიის შემცველობის ექსპონენციალური (მკვეთრი) მატებით. ეს კანონზომიერება გელათის შემთხვევაზეც ვრცელდება, სადაც მდგომარეობა (დროებით) გაუარესდა 2026 წელს, ვინაიდან 2025 წელს შენობამ მზის სითბო ნაკლებად დააგროვა. მიუხედავად იმისა, რომ ზაფხულის პერიოდში იატაკის კონდენსაცია ბუნებრივი მახასიათებელია, მას უარყოფითი გავლენა აქვს, რადგან ხელს უწყობს ობის სოკოს განვითარებასა და მავნებლების გავრცელებას (ინფესტაციას). სრულიად ლოგიკური და მიზანშეწონილია იმ ზომების განხილვა, რომლებიც თავიდან აგვაცილებს ამ უარყოფით ფენომენს. ზოგადად, ამ მიზნით მიღებული ზომები მოიცავს როგორც ბიოციდების გამოყენებას, ისე გარემო პირობების ტრანსფორმაციას (მოდულიკაციას).

არ არის საჭირო ველოსიპედის ხელახლა გამოგონება. გთხოვთ, თავი აარიდოთ ისეთ სახიფათო, თვითნებურ მეთოდებს, როგორიცაა ჩვეულებრივი გამათბობლების, ვენტილატორების, ჰაერის გამომშრობლებისა და სხვა მსგავსი მოწყობილობების გამოყენება.

იატაკის კონდენსაციის თავიდან აცილების ერთადერთი გზაა იატაკის ტემპერატურის ფრთხილი (ექაპობრივი) აწევა რამდენიმე გრადუსით (ცელსიუსით) და ისიც მხოლოდ იმ პერიოდში, როდესაც იატაკის ზედაპირი უახლოვდება ნამის წერტილს. ამ მიზნის მიღწევა შესაძლებელია სამი გზით:

- (i) იატაკქვეშა გათბობის სისტემის დამონტაჟება;
- (ii) (ii) კრიტიკულ პერიოდში, პრობლემურ (დაინტერესებულ) არეალში მოდულური გასათბობი პლატფორმების განთავსება;
- (iii) (iii) კრიტიკული პერიოდის განმავლობაში, იატაკის პრობლემური ნაწილების უზრუნველყოფა ინფრაწითელი (IR) გამოსხივებით.

ზემოაღნიშნულ სამ სისტემას გააჩნია განსხვავებული ღირებულება, ვიზუალური გავლენა, ეფექტურობა და პოზიტიური მხარეები, თუმცა მათ ასევე ახასიათებთ გვერდითი (უარყოფითი) ეფექტებიც. ყველაზე სახიფათო სისტემას წარმოადგენს მაღალტემპერატურული ინფრაწითელი (IR) წყაროების გამოყენება, განსაკუთრებით მაშინ, როდესაც მათ მართავს პერსონალი, რომელსაც არ გააჩნია სათანადო სპეციალიზაცია გარემო ფიზიკის მიმართულებით. გარდა ამისა, ინფრაწითელი (IR) წყაროების მაღალი ტემპერატურა ცვლის შიდა მიკროკლიმატურ ვითარებას და არღვევს ჰაერის ბუნებრივ დაშრევებას (სტრატეფიკაციას); ამასთანავე, მისგან წარმოქმნილი ჰაერის მასების მოძრაობა ზედაპირებზე ავრცელებს შეწონილ ნაწილაკებს (მათ შორის სპორებს), რაც იწვევს კედლების ბიოლოგიურ დაინფიცირებას (ინფესტაციას) და შავი ლაქების გაჩენას.

გელათისთვის შესაძლებელია ორი ვარიანტის განხილვა:

- (i) გელათის რეაბილიტაციის კომიტეტი მიიჩნევს, რომ თბილ სეზონზე იატაკის დროებითი ნესტიანობა (სინესტე) ნორმალური მოვლენაა ამ ნაგებობისთვის; რომ ის საუკუნეების განმავლობაში ყოველწლიურად მეორდება; და, გარდა ამისა, მიმდინარე წელს მდგომარეობა შესაძლოა ოდნავ გაუარესებულიც იყოს გარე დამცავი საფარით გამოწვეული სითბოს ნაკლები დაგროვების გამო. ამგვარი ჰიპოთეზის პირობებში, შესაძლებელია რეალობის მახასიათებლების გათვალისწინება, მისი მიღება და ყველაფრის იმგვარად დატოვება, როგორც არის და საუკუნეების მანძილზე იყო.
- (ii) თუ გელათის რეაბილიტაციის კომიტეტი შეშფოთებულია იატაკის სინესტის გამო და მიიჩნევს მას პრიორიტეტად, ან თვლის, რომ შიდა ბუნებრივი მიკროკლიმატი უნდა გაუმჯობესდეს, შესაძლებელია განხილულ იქნას იატაკის გათბობის სისტემის მოწყობა.

კონსერვაციის მიზნით ფარდობითი ტენიანობის (RH) დასაწევად შენობის გათბობის პრაქტიკას „კონსერვაციული გათბობა“ ეწოდება და იგი განსაკუთრებით ფართოდ გამოიყენება ჩრდილოეთ ევროპაში ზაფხულის სინესტის დასაბალანსებლად. ეს მეთოდი კარგად არის ცნობილი და ამომწურავად არის განხილული სამეცნიერო ლიტერატურაში (მაგალითად: კამუფო და სხვები, 2007 წ. „ეკლესიების გათბობა და კულტურული მემკვიდრეობის დაცვა: სხვადასხვა გათბობის სისტემების დადებითი და უარყოფითი მხარეების გზამკვლევი“, Electa, Mondadori; კამუფო, ევროპული სტანდარტის EN 15759-1: 2011 „კულტურული ფასეულობების კონსერვაცია — შიდა მიკროკლიმატი —

ნაწილი 1: სახელმძღვანელო მითითებები ეკლესიების, ეგვტერებისა და სხვა საკულტო ნაგებობების გათბობისთვის“ მთლიანი თავი (კერძოდ, 7.2.2 პარაგრაფი) ეძღვნება სწორედ ამ საკითხს, კერძოდ:

პარაგრაფი 7.2.2 კონსერვაციული გათბობა. „კონსერვაციული გათბობა იყენებს თერმულ ენერგიას (სითბოს) შიდა მიკროკლიმატის გასაუმჯობესებლად, რომელიც აუცილებელია ძეგლის კონსერვაციისთვის. მისი პირველადი მიზანია ფარდობითი ტენიანობის RH სტაბილურ და შესაბამის დონეზე შენარჩუნება მთელი წლის განმავლობაში, რათა მინიმუმამდე იქნას დაყვანილი RH-ის მერყეობით გამოწვეული დაზიანებები, თავიდან იქნას აცილებული სინესტე და ბიოდეგრადაცია. კონსერვაციული გათბობა შესაძლოა საჭირო გახდეს ზაფხულშიც კი, რათა ფარდობითი ტენიანობა RH შენარჩუნდეს ობის სოკოს განვითარების ზღვარს ქვემოთ. კონსერვაციული გათბობის მეორად მიზანს წარმოადგენს შენობის საფარის შიდა მხარის საკმარისად თბილ მდგომარეობაში შენარჩუნება, რათა თავიდან იქნას აცილებული ტენის კონდენსაცია ან ყინვა. კონსერვაციულ გათბობას შეუძლია მხოლოდ RH-ის შემცირება; იმ შემთხვევაში, თუ შიდა მიკროკლიმატი ზედმეტად მშრალია, საჭირო იქნება სხვა ზომების მიღება“. შემდგომ აღნიშნული სტანდარტის ეს პარაგრაფი გრძელდება კომენტარებითა და რეკომენდაციებით კონსერვაციული გათბობის მეთოდოლოგიისა და მისი კონტროლის შესახებ.

6. შესაბამისი ევროპული სტანდარტები

EN 15757: 2010. კულტურული მემკვიდრეობის კონსერვაცია — ტემპერატურისა და ფარდობითი ტენიანობის სპეციფიკაციები ორგანულ ჰიგროსკოპულ მასალებში კლიმატით გამოწვეული მექანიკური დაზიანების შესაზღუდად.

EN 15758: 2010. კულტურული მემკვიდრეობის კონსერვაცია — ჰაერისა და ობიექტების ზედაპირის ტემპერატურის გაზომვის პროცედურები და ხელსაწყოები.

EN 16242: 2012. კულტურული მემკვიდრეობის კონსერვაცია — ჰაერში ტენიანობის და ჰაერსა და კულტურულ ფასეულობებს შორის ტენის მიმოცვლის გაზომვის პროცედურები და ხელსაწყოები.

EN 16682: 2017. კულტურული მემკვიდრეობის კონსერვაცია — უძრავი კულტურული მემკვიდრეობის შემადგენელ მასალებში ტენიანობის ან წყლის შემცველობის გაზომვის მეთოდები.

EN 15759-1: 2011. კულტურული მემკვიდრეობის კონსერვაცია — შიდა კლიმატი — ნაწილი 1: სახელმძღვანელო მითითებები ეკლესიების, სამლოცველოებისა და სხვა საკულტო ნაგებობების გათბობისთვის.

EN 15759-2. კულტურული მემკვიდრეობის კონსერვაცია — შიდა კლიმატი — ნაწილი 2: ვენტილაციის მართვა კულტურული მემკვიდრეობის შენობებისა და კოლექციების დასაცავად.