

ინფორმაცია

მონაცემთა ბაზების ენერგოეფექტური და მდგრადი სისტემები: გამოწვევები, ტექნოლოგიები და განვითარების პერსპექტივები

ზებურ სურმანიძე

ელ.ფოსტა: zebur.surmanidze@bsu.edu.ge

ბათუმის შოთა რუსთაველის სახელმწიფო უნივერსიტეტი

აბსტრაქტი: სტატიაში განხილულია ენერგოეფექტური მონაცემთა ბაზების მართვის სისტემების (DBMS) მნიშვნელობა მდგრადი ციფრული ინფრასტრუქტურის განვითარების კონტექსტში. ნაშრომში გაანალიზებულია მონაცემთა ცენტრების მზარდი ენერგომომხმარების ტენდენციები და მათი გავლენა გარემოზე, კერძოდ CO₂ ემისიების ზრდა. წარმოდგენილია ენერგოოპტიმიზაციის ისეთი თანამედროვე ტექნიკები, როგორიცაა დინამიური ძაბვისა და სიხშირის მასშტაბირება (DVFS), დისკების დატვირთვის კონსოლიდაცია და AI-ინტეგრირებული ოპტიმიზაცია. კვლევაში პარალელურად გავლენილია მონაცემთა ბაზების ენერგოეფექტურობასა და შენობების ენერგეტიკული მახასიათებლების მართვას შორის, მათ შორის უკრაინაში განხორციელებული ენერგეტიკული ბენჩმარკინგის მოდელის მაგალითზე. ემპირიული შედეგები ადასტურებს, რომ აღნიშნული მეთოდების გამოყენებით შესაძლებელია ენერგიის 20%-დან 50%-მდე დაზოგვა პერფორმანსის მინიმალური დანაკარგით.

საკვანძო სიტყვები: მონაცემთა ბაზები, ენერგოეფექტურობა, მდგრადი კომპიუტინგი (Green Computing), DVFS, ბენჩმარკინგი,

1.შესავალი.

დღესდღეობით, მონაცემთა ბაზების სისტემები (DBMS) წარმოადგენენ ციფრული ინფრასტრუქტურის ერთ-ერთ მთავარ კომპონენტს, რომელიც უზრუნველყოფს მონაცემების შენახვას, დამუშავებას და წვდომას. თუმცა, მონაცემთა მოცულობის ექსპონენციური ზრდა, AI-ტექნოლოგიების განვითარება და ღრუბლოვანი კომპიუტინგის გავრცელება იწვევს ენერგომომხმარების მკვეთრ ზრდას. 2025 წლის მდგომარეობით, მონაცემთა ცენტრები მსოფლიო ელექტროენერგიის 3-5%-ს მოიხმარენ, რაც CO₂ ემისიების მნიშვნელოვან წყაროდ იქცა (IEA, 2025; LBNL, 2025). ეს გამოწვევა განსაკუთრებით აქტუალურია მდგრადი განვითარების კონტექსტში, სადაც ენერგოეფექტურობა ხდება პრიორიტეტი.

ეს სტატია განიხილავს ენერგოეფექტურ მონაცემთა ბაზებს, როგორც მდგრადი კომპიუტინგის (green computing) მნიშვნელოვან ასპექტს. ჩვენ ვიყენებთ ბოლო კვლევებს, მათ შორის Yi-Cheng Tu-ს და სხვების მუშაობას და Antonina Sityuk-ის სტატიას რათა გამოავლინოთ პარალელები მონაცემთა ბაზების ენერგოეფექტურობასა და შენობების ენერგეტიკულ მახასიათებლებს შორის. ეს უკანასკნელი გვთავაზობს მოდელს ეროვნული ბაზების შექმნისთვის, რომელიც შეიძლება ადაპტირდეს DBMS-ებისთვის. სტატიის მიზანია აჩვენოს, თუ როგორ

შეიძლება ენერგოეფექტურობის ოპტიმიზაცია გახდეს DBMS-ების დიზაინის ძირითადი ელემენტი, შენარჩუნებული პერფორმანსით.

2.ძირითადი ტექსტი.

მონაცემთა ბაზების ენერგომოხმარება ძირითადად მოდის აპარატურული კომპონენტებიდან: CPU, დისკები (HDD/SSD), მეხსიერება და გაგრილების სისტემები. აღინიშნება რომ CPU და დისკები მოიხმარენ აქტიური ენერგიის 70%-ზე მეტს. მაგალითად, query processing-ის დროს joins და aggregates მოითხოვს მაღალ CPU დატვირთვას, რაც იწვევს ენერგიის ზრდას. დისკები, განსაკუთრებით HDD, მოიხმარენ ენერგიას მუდმივი როტაციის გამო, თუნდაც idle რეჟიმში [1].

გარემოზე გავლენა მოიცავს CO₂ ემისიებს და წყლის მოხმარებას გაგრილებისთვის. ანალოგიური პრობლემა შენობებში, სადაც ენერგეტიკული მახასიათებლები იწვევს დანაკარგებს 2.5-3-ჯერ მეტს ნორმაზე. უკრაინაში შენობები მოიხმარენ ენერგიის 40%-ს, რაც პარალელურია მონაცემთა ცენტრების პრობლემასთან. 2025 წელს, გლობალური მონაცემთა ცენტრების ენერგომოხმარება შეიძლება 8%-მდე გაიზარდოს, რაც საჭიროებს მდგრად მიდგომებს[2].

კომპონენტი	ენერგომოხმარება (%)	მიზეზები	გავლენა გარემოზე
CPU	40-50	Query optimization, computations	მაღალი CO ₂ ემისია
დისკები (HDD/SSD)	30-40	I/O ოპერაციები, idle რეჟიმი	სითბოს გამოყოფა, წყლის მოხმარება
მეხსიერება	10-20	Buffer management	ნაკლები, მაგრამ მუდმივი მოხმარება
გაგრილება	10-20	სერვერების გაგრილება	წყლის და ენერგიის დანაკარგები

ცხრილი 1: ენერგომოხმარების წყაროები DBMS-ებში

ენერგოეფექტურობის მიღწევა შესაძლებელია რესურსების მოხმარების შეცვლით და აპარატურის დაბალენერგეტიკულ რეჟიმებზე გადაყვანით. თანამედროვე კვლევები გვთავაზობს E2DBMS მოდელს, რომელიც მოიცავს:

- 1) ენერგოეფექტური მოთხოვნების ოპტიმიზაცია (დროის ოპტიმიზაცია): ტრადიციული ოპტიმიზატორები ფოკუსირებულნი არიან დროზე, მაგრამ ენერგოეფექტური ვერსია ითვალისწინებს ენერგიის ხარჯს. მაგალითად, დაბალ CPU-დატვირთვის პლანები (low-CPU plans) ამცირებენ ენერგიას 20-40%-ით, მცირე დროის დანაკარგით. ეს იყენებს cost model-ს

$$C = P \times T^n$$

სადაც,

- P - ენერგია (ენერგიის მოხმარების დონე (Power, ვატი));
- T - დრო (შესრულების დრო (Time, წამი));
- n - პარამეტრი ბალანსისთვის. (პარამეტრი, რომელიც აწყობს დროსა და ენერგიას შორის ბალანსს).

- 2) დინამიური ძაბვისა და სიხშირის მასშტაბირება (DVFS): CPU-ს სიხშირის დაწევა მნიშვნელოვნად ამცირებს ენერგიის ხარჯს, რადგან ენერგიის მოხმარება კუბურად არის დამოკიდებული სიხშირეზე. შესაბამისად, სიხშირის შემცირება ენერგიას მნიშვნელოვნად დაზოგავს. კვლევებმა აჩვენა, რომ I/O-დამოკიდებული სამუშაოების დროს შესაძლებელია ენერგიის დაახლოებით 45%-იანი დაზოგვა. DVFS-ის მართვა მიმდინარეობს უკუკავშირის (feedback) მექანიზმის საშუალებით, რომელიც ეხმარება CPU-ს შეინარჩუნოს პერფორმანსი (შესრულების ეფექტურობა) და ამავე დროს ენერგიის მოხმარება მაქსიმალურად შეამციროს [3].
- 3) დისკების დატვირთვის კონსოლიდაცია: ტრადიციული დატვირთვის თანაფარდობის (load balancing) მეთოდის ნაცვლად, დატვირთვის კონსოლიდაცია მიზნად ისახავს ენერგიის დაზოგვას იმ გზით, რომ არასაჭირო დისკებს უშვებს დაბალ ენერგიას ხარჯვად რეჟიმში (low-power mode). აღწერენ მონაცემთა განთავსების (data placement) მიდგომას, სადაც აქტიური („ცხელი“) მონაცემები კონცენტრირდება რამდენიმე დისკზე, რაც საშუალებას იძლევა ენერგიის დაახლოებით 50%-იანი დაზოგვა [1]. ამ პრინციპს იყენებს შენობების ენერგეტიკული მახასიათებლების ოპტიმიზაციისთვის, რაც შეიძლება ადაპტირდეს მონაცემთა ბაზების ენერგოეფექტურ მართვაზეც, განსაკუთრებით provenance-ის (მონაცემთა წარმომავლობის) თვალსაზრისით [2, 4].
- 4) AI-ინტეგრაცია: დასწავლილი ინდექსები (Learned indexes) და მანქანური დასწავლის მეთოდები, როგორიცაა გაძლიერებული სწავლება (reinforcement learning), ეხმარება მონაცემთა ბაზების პარამეტრირება და ოპტიმიზაციაში, რაც შედეგად ენერგიის ხარჯს ამცირებს. მაგალითად, ვექტორული მონაცემთა ბაზებში (vector databases) მახლობლად მდებარე ნიმუშების (ANN search) ოპტიმიზაცია იწვევს CPU-ს დატვირთვის დაახლოებით 30%-იან შემცირებას, რაც განპირობებულია უფრო ეფექტური ძებნის ალგორითმებით [3].

ტექნოლოგია	დაზოგვა (%)	პერფორმანსის დანაკარგი (%)	გამოყენების მაგალითი
Energy-Aware Optimizer	20-40	5-15	PostgreSQL მოდიფიკაცია
DVFS	15-45	10-20	Intel CPUs
Load Consolidation	40-50	<10	Multi-disk arrays
Serverless Scaling	30-60	ცვალებადი	AWS Aurora
AI-Based Tuning	20-35	<5	Learned Indexes

ცხრილი 2: ენერგოეფექტური ტექნოლოგიების შედარება

ენერგოეფექტურ DBMS-ების შექმნა აწყდება გამოწვევებს:

- ბალანსი შესრულებასა და ენერგიას შორის: ცნობილია, რომ ზოგიერთ სამუშაოში (workload) ენერგიის დაზოგვა იწვევს შესრულების დროის ზრდას. ამ პრობლემის გადაჭრა შესაძლებელი გახდება მრავალმიზნობრივი ოპტიმიზაციით (multi-objective optimization), რომელიც ერთდროულად ითვალისწინებს დროს და ენერგიას[3].
- დინამიური გარემო: სამუშაო დატვირთვების მუდმივი ცვლილება მოითხოვს სისტემის ადაპტირებას რეალურ დროში - ანუ ადაპტიურ კონტროლს (adaptive control).

მაგალითად, Sityuk (2021) აღწერს უკრაინის ეროვნულ ბაზას, რომელიც მოიცავს 100,000 შენობას და იყენებს ბენჩმარკინგს (benchmarking), რაც შეიძლება გამოყენებულ იქნას DBMS-ების მონიტორინგსა და ოპტიმიზაციაში [4].

- ხელოვნური ინტელექტის ინტეგრაცია: ვექტორული ძებნა (vector search) და დიდი ენოვანი მოდელები (LLM) ზრდიან სისტემის შესაძლებლობებს, თუმცა ამავედროულად ზრდიან ენერგიის მოხმარებასაც. მომავლისთვის quantum databases (კვანტური მონაცემთა ბაზები) შესაძლოა გახდეს მნიშვნელოვანი გამოსავალი.
- მდგრადობა: Sityuk აღნიშნავს მულტიპლიკატიურ ეფექტს, რომელიც მოიცავს როგორც ეკონომიკურ დაზოგვას, ისე CO₂-გამონაბოლქვის შემცირებას. მსგავსად, DBMS-ებში ენერგოეფექტურობის გაუმჯობესება დადებითად იმოქმედებს გლობალურ ემისიებზე.

თანამედროვე ტექნოლოგიური გარემო მუდმივად იცვლება და მოთხოვნები მონაცემთა ბაზების მართვაზეც შესაბამისად განიცდის ტრანსფორმაციას. ენერგოეფექტურობის საკითხი კი დღითიდღე უფრო მნიშვნელოვანი ხდება არა მხოლოდ ფინანსური დაზოგვის, არამედ გარემოს დაცვის, მდგრადი განვითარების და კანონმდებლობის მოთხოვნების გამო.

ერთი მთავარი მიმართულებაა Edge Computing-ისთვის DBMS-ების ადაპტაცია - მონაცემთა დამუშავების ადგილობრივი მოწყობილობებზე (edge devices) გადატანა მნიშვნელოვნად ამცირებს ცენტრალიზებულ მონაცემთა ცენტრებზე დატვირთვას და ზოგავს ქსელის ენერგიასა და ბანდვიდს. ამავე დროს, ეს ხდის სისტემას უფრო რეაგირებად და ენერგოეფექტურს.

მნიშვნელოვანია ასევე მწვანე სტანდარტების და რეგულაციების შემუშავება, რომლებიც განსაზღვრავს DBMS-ების ენერგოეფექტურობის კრიტერიუმებს. საერთაშორისო სტანდარტები, როგორიცაა ISO-ის მსგავსი ნორმატიული აქტები, ხელს შეუწყობენ ენერგიის ხარჯების კონტროლს, გადაწყვეტილებების უფრო მიზნობრივ მართვას და ინდუსტრიის საერთო მდგრადობას.

გარდა ამისა, პროგრესული და მასშტაბური მონაცემთა ბაზები საჭიროებენ ეროვნული და რეგიონული მონაცემთა ბაზების ინტეგრაციას, რაც საშუალებას იძლევა ერთიანად გააკონტროლონ და დააკონფიგურირონ ენერგიის მოხმარება. ამ მხრივ, მკვლევარების მიერ უკრაინაში შემუშავებული მოდელი, რომელიც აერთიანებს 100,000 შენობის ენერგეტიკულ მონაცემებს და იყენებს benchmarking-ს, წარმოადგენს საუკეთესო მაგალითს, როგორ შეიძლება ეფექტურად მართო დიდი მასშტაბის ენერგომოხმარება მონაცემთა ბაზებში [3].

3. ემპირიული შედეგები და პრაქტიკული გამოცდილება

პირველი მნიშვნელოვანი ნაბიჯები ამ მიმართულებით გაკეთებულია ჯერ კიდევ 2012 წელს და ექსპერიმენტულად დაამტკიცებულია, რომ ენერგოეფექტური DBMS (E2DBMS) შეძლებს შეამციროს ენერგიის ხარჯი TPC-H ბენჩმარკებზე დაახლოებით 20%-ით, რაც უდავოდ მნიშვნელოვანი შედეგია ინდუსტრიისთვის [2].

სხვადასხვა ტექნოლოგიების კომბინაციით, განსაკუთრებით დინამიური ძაბვისა და სიხშირის მასშტაბირებით (DVFS), რომელიც CPU-ს ენერგიის მოხმარებას უკავშირდება, მიღწეულ იქნა CPU-ს ენერგიის დაზოგვა 30%-ის ფარგლებში. ემპირიული შედეგები აჩვენებს, რამდენად ეფექტურია DVFS ტექნოლოგია ენერგოოპტიმიზაციაში.

უკრაინაში 2021 წელს განხორციელებულმა საპილოტე პროექტმა, კიდევ უფრო შთამბეჭდავი შედეგები გამოიღო: 12,000 შენობის მონაცემთა ბაზის მართვით, პროექტმა განახორციელა ენერგიის 50%-იანი დაზოგვა ადგილობრივ ბიუჯეტში. ეს არა მხოლოდ ეკონომიური

ჯგერ სურამიძე

სარგებლის მომტანია, არამედ ნათელი მაგალითია იმისა, თუ როგორ შეიძლება მონაცემთა ბაზების benchmarking და ოპტიმიზაცია დაეხმაროს ქვეყნის მასშტაბით ენერგომომხმარების ეფექტურ მართვას [5].

სისტემა/წყარო	დაზოგვა (%)	პერფორმანსი	კომენტარი
E2DBMS (Tu et al.)	20-50	მცირე დანაკარგი	CPU და დისკების ოპტიმიზაცია
უკრაინის ბაზა (Sityuk)	50	N/A	შენობების ენერგეტიკა
PostgreSQL DVFS	15-30	10-20	I/O-bound workloads
Cloud Serverless	40-60	ცვალებადი	AWS/MongoDB

ცხრილი 3: ემპირიული შედეგები სხვადასხვა სისტემებში

4. დასკვნა.

ჩატარებულმა კვლევამ აჩვენა, რომ მონაცემთა ბაზების ენერგოეფექტურობა აღარ წარმოადგენს მხოლოდ ვიწრო ტექნოლოგიურ გამოწვევას, ის იქცა მდგრადი ციფრული ეკოსისტემის განუყოფელ ნაწილად. მონაცემთა მოცულობის ექსპონენციური ზრდა და AI-ტექნოლოგიების ინტენსიური გამოყენება საჭიროებს ისეთ კომპლექსურ მიდგომებს, რომლებიც დროსა და ენერგიას შორის ოპტიმალურ ბალანსს უზრუნველყოფენ.

ნაშრომში განხილული ემპირიული შედეგები და თეორიული მოდელები რამდენიმე ფუნდამენტურ დასკვნამდე მიგვიყვანს:

- **ტექნოლოგიური სინერგია:** ისეთი მეთოდების კომბინაცია, როგორიცაა დინამიური ძაბვისა და სიხშირის მასშტაბირება (DVFS) და დისკების დატვირთვის კონსოლიდაცია, საშუალებას იძლევა CPU-ს ენერგომომხმარება 30-45%-ით შემცირდეს.
- **ბენჩმარკინგის როლი:** უკრაინაში 2021 განხორციელებული 12,000 შენობის საპილოტე პროექტი ნათლად ადასტურებს, რომ მონაცემთა ბაზების სწორ მართვასა და ანალიზს შეუძლია რესურსების 50%-იანი დაზოგვა მოიტანოს. აღნიშნული მოდელების ადაპტაცია DBMS-ებში ეროვნული და რეგიონული მასშტაბის მონიტორინგისთვის პრიორიტეტული მიმართულებაა.
- **მულტიპლიკატიური ეფექტი:** ენერგოეფექტური ოპტიმიზატორების დანერგვა (მაგალითად, E2DBMS მოდელი) უზრუნველყოფს არა მხოლოდ ფინანსურ სარგებელს, არამედ მნიშვნელოვნად ამცირებს CO₂ ემისიებს, რაც პირდაპირ პასუხობს 2025 წლის ეკოლოგიურ გამოწვევებს.
- **მომავლის პერსპექტივები:** სამომავლო განვითარება დაკავშირებულია AI-ზე დაფუძნებულ ავტომატურ ტუნინგთან, ვექტორული ძებნის ალგორითმების დახვეწასთან და გრძელვადიან პერსპექტივაში - კვანტური მონაცემთა ბაზების პოტენციალის ათვისებასთან.

საბოლოოდ, ენერგოეფექტური მონაცემთა ბაზები (Green DBMS) უნდა იქცეს ინდუსტრიულ სტანდარტად. აუცილებელია მკვლევარებისა და სახელმწიფო უწყებების კოორდინირებული მუშაობა ისეთი მწვანე რეგულაციების შესაქმნელად, რომლებიც უზრუნველყოფენ ციფრული სექტორის მდგრადობას და გლობალური ენერგეტიკული კრიზისის დაძლევას. მომავალ კვლევებში ფოკუსი უნდა გაკეთდეს AI-ინტეგრაციასა და quantum ტექნოლოგიებზე.

*COMPUTER SCIENCE***ENERGY-EFFICIENT AND SUSTAINABLE DATABASE SYSTEMS:
CHALLENGES, TECHNOLOGIES AND DEVELOPMENT PROSPECTS****ZEBUR SURMANIDZE***E-mail:* zebur.surmanidze@bsu.edu.ge*Batumi Shota Rustaveli State University*

ABSTRACT: The article discusses the significance of energy-efficient Database Management Systems (DBMS) in the development of a sustainable digital infrastructure. The paper analyzes the increasing energy consumption trends of data centers and their environmental impact, specifically the rise in CO₂ emissions. Modern energy optimization techniques are presented, including Dynamic Voltage and Frequency Scaling (DVFS), load consolidation, and AI-integrated optimization. The research draws parallels between database energy efficiency and building energy performance management, illustrated by Antonina Sityuk's energy benchmarking model implemented in Ukraine. Empirical results demonstrate that these methods can achieve energy savings between 20% and 50% with minimal performance loss.

KEYWORDS: Database Systems, Energy Efficiency, Green Computing, DVFS, Benchmarking

გამოყენებული ლიტერატურა:

1. Tu, Y.-C., Wang, X., Zeng, B. (2012). A System for Energy-Efficient Data Management. SIGREC12.
2. Xu, Z. (2023). Energy-Efficient Query Processing in Database Systems: A Survey. IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering.
3. Belkhir, L., & Elmeligi, A. (2018). Assessing ICT global emissions footprint: Trends to 2040 & recommendations. Journal of Cleaner Production.
4. LBNL. (2025). United States Data Center Energy Usage Report.
5. Ситюк, А. (2021). База данных энергетических и эксплуатационных характеристик общественных зданий. DOI: 10.5604/01.3001.0014.9225.