

**RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE**  
Enerģētikas un elektrotehnikas fakultāte  
Enerģētikas institūts

**Hasan H. COBAN**

Doktora studiju programmas „Enerģētika un elektrotehnika” doktorants

**OPTIMIZĀCIJAS PAŅĒMIENI ĪSTERMIŅĀ UN ILGTERMIŅĀ  
ENERĢIJAS RAŽOŠANĀ MAZĀS HIDROELEKTROSTACIJĀS**

**Promocijas darba kopsavilkums**

Zinātniskais vadītājs  
Profesors *Dr. habil. sc. ing.*  
**A. SAUHATS**

**RTU Izdevniecība**  
**Rīga 2016**

Coban H. H. Optimizācijas paņēmieni īstermiņa un ilgtermiņa enerģijas ražošanā mazās hidroelektrostacijās. Promocijas darba kopsavilkums. – Rīga: RTU Izdevniecība, 2016. – 38 lpp.

Iespiests saskaņā ar RTU Promocijas padomes P-05 (Enerģētika) 2016. gada 9. maija lēmumu Nr. 29/16.

**PROMOCIJAS DARBS**  
**IZVIRZĪTS INŽENIERZINĀTŅU DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI RĪGAS**  
**TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ**

Promocijas darbs inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2016. gadā 16. jūnijā Rīgas Tehniskās universitātes Enerģētikas un elektrotehnikas fakultātē, Āzenes iela 12/1, 306. auditorijā.

**OFICIĀLIE RECENZENTI**

Profesors *Dr. habil. sc. ing.* **Vladimirs Čuvičins**  
Rīgas Tehniskā universitāte

*Dr. sc. ing.* **Aleksandrs Ļvovs**  
AS Augstsprieguma tīkls, Režīmu un plānošanas dienesta vecākais elektroinženieris

Asoc. profesors *Dr. sc. ing.* **Audrius Senulis**  
Klaipēdas Universitāte, Lietuva

**APSTIPRINĀJUMS**

Es apstiprinu, ka esmu izstrādājis doto promocijas darbu, kas iesniegts izskatīšanai Rīgas Tehniskajā universitātē inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai. Promocijas darbs nav iesniegts nevienā citā universitātē zinātniskā grāda iegūšanai.

Hasan H. COBAN ..... (Paraksts)

Datums: .....

Promocijas darbs uzrakstīts latviešu valodā, tas satur ievadu, 5 nodaļas, secinājumus un rekomendācijas, literatūras sarakstu un 2 pielikumus. Darba kopējums ir 155 datorsalikuma lappuses, kurās ietverti 79 attēli un 18 tabulas, un pielikuma 2 lappuses. Literatūras sarakstā norādīti 148 izmantotās literatūras avoti.

# SATURS

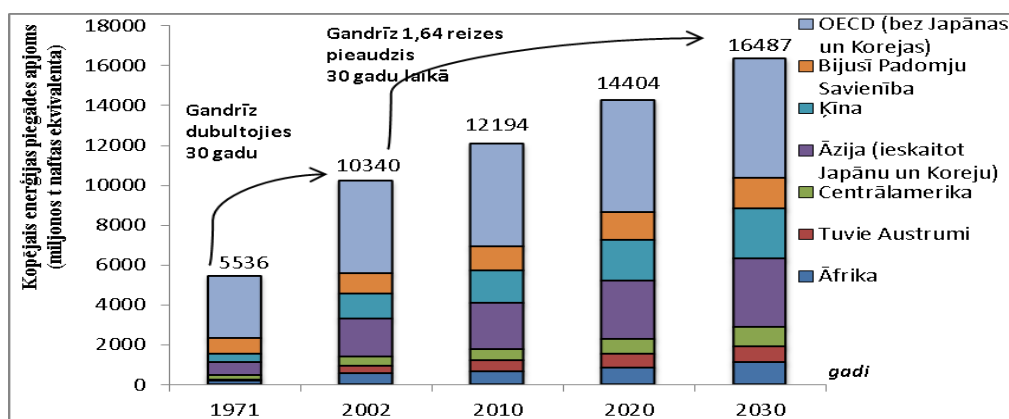
1. VISPĀRĪGS DARBA APRAKSTS.....	5
Promocijas darba tēmas aktualitāte.....	5
Promocijas darba mērķi .....	7
Pētījumu metodes un rīki .....	7
Promocijas darba novitāte un galvenie rezultāti .....	7
Promocijas darba praktiskā nozīme .....	8
Autora personiskais ieguldījums veiktajos pētījumos.....	8
Darba tematika .....	8
Promocijas darba aprobācija .....	9
Darba struktūra un apjoms .....	10
2. MHES ATTĪSTĪBAS PAMATI .....	10
2.1. Hidroenerģija pasaulē un Turcijā .....	10
2.2. MHES tehnoloģiju pārskats .....	11
2.3. MHES attīstības stadijas .....	11
2.4. Risināmās problēmas .....	12
2.5. Sadarbības iespējas un papildu peļņas sadalījums .....	12
3. MHES PROJEKTĒŠANAS UN EKSPĻUATĀCIJAS PAMATI.....	13
3.1. Optimizācijas problēmas formulējums un risināšanas algoritma struktūra .....	13
3.2. Elektrostacijas modelis .....	14
3.3. Vispārīgs matemātiskais programmēšanas uzdevums .....	14
3.4. MHES darbības ierobežojumi.....	15
3.5. Mērķa funkcijas.....	16
3.6. Sadarbība. Šeplija sadalījuma modelis kaskādes elektrostacijām.....	17
4. ALGORITMA SINTĒZE MHES OPTIMIZĀCIJAI UN TEHNISKI EKONOMISKAJAM PAMATOJUMAM .....	18
4.1. MHES optimizācijas uzdevuma vienkāršošana .....	19
4.2. Optimizācijas uzdevuma sadalīšana un ierobežošana.....	20
4.3. Izmēģinājumu skaita samazināšana, izmantojot Montekarlo metodi peļņas aplēšanai .....	22
4.4. Koalīcijā darbojošie MHES modeļi un peļņas veidošanās .....	23
4.5. Prognozēšanas procesi .....	23
4.6. Ilgtermiņa plānošanas problēmu īpatnības.....	24
5. PIEMĒRI UN ATSEVIŠĶA GADĪJUMA IZPĒTE .....	25
5.1. Prognozēšanas process.....	26
5.1.1. Ūdens caurplūduma un elektroenerģijas tirgus cenu prognozēšana .....	26
5.2. Optimizācijas metožu izmantošanas rezultāti un salīdzinājums Safas MHES .....	27
5.3. Papildu ienākumu sadalījums, izmantojot Šeplija vērtību .....	29
5.4. Izmaksu un ieguvumu analīze Safas HES.....	31
5.5. Ūdenskrātuves tilpuma un diskonta likmes ietekme uz Safas HES peļņu.....	34
SECINĀJUMI UN IETEIKUMI .....	35
IZMANTOTĀ LITERATŪRA.....	36

# 1. VISPĀRĪGS DARBA APRAKSTS

## Promocijas darba tēmas aktualitāte

Gandrīz viss, ko savā dzīvē darām jau kopš dzimšanas brīža, atkarīgs no enerģijas. Daudzas specializētas institūcijas, piemēram, Starptautiskā enerģijas aģentūra (SEA), veido prognozes par to, kā nākotnē pieaugs enerģijas pieprasījums; sagaidāms (1.1. att.) ka tā vērtība nākamo 30 gadu laikā pieaugs aptuveni par 60 % [1,2]. Svarīgākais jautājums ir, kā apmierināt šo pieprasījumu.

Kopš industriālās revolūcijas visplašāk pazīstams bijis fosilais kurināmais. Tomēr fosilā kurināmā ierobežotība un ieguves sarežģītība padara uz šo kurināmā veidu balstītu enerģiju ilgtnespējīgu. Tā rezultātā cilvēce ir atklājusi dabā balstīto atjaunīgo enerģiju. Atjaunīgā enerģija ir viens no galvenajiem jautājumiem mūsdienu pasaulē, un tai arī turpmāk var būt globāli nozīmīga loma. Tendence, kas parādījās 20. gadsimta pēdējā ceturksnī, šķiet, turpinās intensīvāk nekā iepriekš. Šajā jomā darbojas arī starptautiskās organizācijas, lai izveidotu kopīgu politiku atjaunīgās enerģijas sniegto priekšrocību izmantošanai multinacionālā līmenī. Atjaunīgā enerģija ir nozīmīga tās sniegto labumu dēļ. Galvenie no tiem ir saistīti ar vides aizsardzību: šiem resursiem ir daudz mazāka ietekme uz vidi nekā konvencionālajām enerģijas tehnoloģijām; tie spēj nodrošināt enerģiju mūsu bērnbērniem, kas neizbeidzas; nozīmīga ir arī energodrošība, kurai ir svarīga loma mūsu nākotnes nodrošināšanā, jo energoatkarības paaugstināšanās ietekmē ne tikai mūsu nacionālo enerģijas politiku.



1.1. att. Pasaulē enerģijas pieprasījums no 1971. līdz 2030. gadam [3,4,5].

Runājot par atjaunīgo enerģijas avotu daudzveidību valstīs, kurām nav fosilo primāro resursu, kas ir nafta, dabasgāze un ogle, nozīmīgāka kļūst atkarības samazināšana no ārvalstu avotiem un ar zemu oglekļa izmantošanas līmeni saistīti ekonomiskās attīstības centieni no lēmumu pieņēmējiem un valstīm, kurām ir izdevīgs ģeogrāfiskais novietojums, kā tas ir Turcijai. Sakarā ar straujo konvencionālo resursu daudzuma samazināšanos un slodžu pieaugumu konvencionālie primārie resursi Turcijā ap 2020. gadu nespēs apmierināt pieprasījumu. Elektroenerģijas patēriņš pieaug, jo valsts ekonomika strauji aug. Pieaugošais pieprasījums jaunos tirgos, ko veicina iedzīvotāju skaita un rūpniecības apjoma pieaugums, prasa paaugstināt piedāvājuma potenciālu, kā arī ģeneratoru daudzveidību. Primāro enerģijas piegādes avotu diversifikācija samazina atkarību no viena avota un vairo piegādes drošumu. Turcijas elektroenerģijas tirgus ir viens no visātrāk augošajiem pasaulē, tā ikgadējais pieaugums vidēji 2010. un 2011. gadā saskaņā ar Enerģijas un resursu ministrijas datiem bija aptuveni 9 % [4]. Šis patēriņa pieaugums prasa jaunas investīcijas.

Konvencionālo enerģijas avotu izmantošanas apjoms samazinās, pasaulē pieaugot rūpēm par vides aizsardzību. Šajā situācijā valdībai būtu jāīsteno 2 stratēģijas: pieprasījuma samazināšana un piedāvājuma palielināšana. Šajā kontekstā atjaunīgajai enerģijai un energoefektivitātei ir īpaša nozīme. Atjaunīgās enerģijas izmantošana attiecas uz enerģijas piedāvājuma pusi un garantē ekoloģisku, ekonomisku un sociālu ilgtspēju enerģijas nozarē. Pastāv dažādi atjaunīgās enerģijas tipi,

piemēram, saules enerģija, hidroenerģija, vēja enerģija, no biomasas iegūstamā, kā arī ģeotermiskā enerģija. Katram no šiem tipiem ir savas izmantojuma jomas, kā arī savas priekšrocības un trūkumi. Šo resursu pārdomāti līdzsvarota kombinācija var nodrošināt enerģijas piedāvājumu valstī un pat aizstāt elektroenerģiju, kas ir tipisks enerģijas avots. Turklāt atjaunīgā enerģija kalpo divu mērķu sasniegšanai: enerģijas ģenerēšanai, lai nosegtu slodzes, un vides aizsardzībai sakarā ar bezizmešu energoresursu izmantošanu. Energoefektivitāte ļauj apmierināt vajadzību pēc elektroenerģijas pieprasījuma samazināšanas, panākot maksimālu ģenerētās enerģijas izmantošanu, tajā pašā laikā samazinot atkritumu apjomu.

Vispamanāmākās enerģijas ražošanas sekas ir cilvēka radītās klimata izmaiņas. Sakarā ar straujo enerģijas patēriņa pieaugumu un globālo sasilšanu, kas apdraud vidi līdztekus nelīdzsvarotajiem un neprognozētajiem fosilā kurināmā cenu pieaugumiem, interese par atjaunīgajiem enerģijas avotiem ir pieaugusi. Šie faktori uzsver atjaunīgās enerģijas avotu izmantošanas pieaugšanas nozīmi. Šajā sakarībā ir radušās mazās hidroelektrostacijas (MHES) kā enerģijas avots, kas tiek akceptēts kā atjaunīgs, viegli attīstāms, lēts, ekonomisks, videi nekaitīgs enerģijas avots un ar vidējo darbmūžu no 50 līdz 100 gadiem. Šo iemeslu dēļ ir pieaugusi mazo hidroelektrostaciju projektu vērtība, radot jaunu tendenci atjaunīgās enerģijas ražošanā.

Turcijai ir milzīgs hidroenerģijas potenciāls. Pastāv pietiekami pierādījumi valsts pašas potenciālam iegūt enerģiju no ūdens resursiem, īpaši tas attiecas uz enerģijas ģenerēšanu pēc pieprasījuma. Hidroenerģija ir droša un ilgtspējīgs enerģijas avots pasaulei, tai iespējami dažādi pozitīvi blakusefekti. Lai to izmantotu, nepieciešams iesaistīt privāto sektoru.

Viena no lielākajām problēmām, ar kādām saskaras pasaule 21. gadsimtā, ir energoapgādes drošums. Hidroenerģijai ir īpaši nozīmīga loma piegādes drošuma nodrošināšanā. Tas izskaidrojams ar hidroenerģijas sniegto enerģijas akumulācijas iespēju ūdenskrātuvēs, kā arī ar ātro ģeneratoru palaidi, ja ir nepieciešamība palielināt jaudu.

Mazās hidroelektrostacijas ilgu laiku ir attīstītas pasaulē [6] un Turcijā, tomēr simtiem to potenciālo būves vietu vēl ir neizmantotas. Daudzās no tām energoobjekta būve būtu ekoloģiski un tehniski iespējama, taču pašreizējā tehnoloģiju attīstības un enerģijas cenu līmenī un, pastāvot pašreizējiem atbalsta mehānismiem, sākotnējās investīcijas neatmaksātos. Efektīvu mazo hidroelektrostaciju attīstībai nepieciešami plaša mēroga pasākumi.

Atjaunīgā enerģija Turcijā joprojām ir attīstības procesā. Lai gan notiek likumdošanas reformas un tiek izdoti noteikumi šī procesa atbalstīšanai, sistēma vēl nav pilnībā noregulēta. Attīstības tempi vēl joprojām neatbilst gaidītajam, un pastāv arī ievērojams neizmantotā potenciāla līmenis. Atjaunīgās enerģijas jomā stimulējošie pasākumi ir galvenais virzītājspēks, kā detalizēti paskaidrots. Atjaunīgās enerģijas avoti (AEA) tiek popularizēti ar dažādu atbalsta mehānismu palīdzību. Turcijā pastāv arī daži atbalsta mehānismi AEA finansējuma piesaistei un objektu būvei. Tāpat saskaņā ar veiktā pētījuma rezultātiem par ievadtarifiem cenas, kas piemērojamas uz AEA orientētai enerģijas ražošanai, nav funkcionējošas, īpaši attiecībā uz hidroelektrostacijām un vēja elektrostacijām.

Hidroelektrostaciju (HES) potenciāls Turcijā tiek izmantots daļēji, jo pārsvarā nenotiek HES režīmu pārvaldība atkarībā no tirgus cenu grafika. Varam redzēt, ka cenu grafiks ģenerēšanas plāna izstrādei ir ļoti sarežģīts. Nepieciešami piemēroti algoritmi un programmatūra. Šie uzdevumi ir aktuāli daudzās valstīs. Problēmas risināšanai veltīts daudz darba [7,8,9,10].

Svarīgi ir atzīmēt, ka HES darbības režīms būtu jāizvēlas, balstoties uz nākotnes prognozi. Tādēļ ir nepieciešams ņemt vērā nenoteikto un gadījuma faktoru neizbēgamo ietekmi. Problēmu vēl vairāk sarežģīt konkurentu esamība, kuru lēmumi ietekmē energosistēmu un enerģijas tirgus nosacījumus.

Apkopojot iepriekš teikto, var atzīmēt, ka:

- 1) nozīmīga ir ūdens resursu izmantošanas popularizēšanas problēma;

- 2) neskatoties uz pētnieku un valdību pūlēm, joprojām pastāv daudzas neatrisinātas problēmas. Īpaši minams, ka ir ļoti svarīgi maksimizēt peļņu, optimāli izvēloties HES parametrus un darbības režīmu.

### **Promocijas darba mērķi**

Šī darba galvenais mērķis ir izstrādāt īstermiņa un ilgtermiņa plānošanas modeļus mazam hidroelektroenerģijas ražošanas objektam, kurš ir cenu ņēmējs un kurš darbojas elektroenerģijas tirgus režīmos un tiecas pēc peļņas maksimizācijas, ievērojot enerģijas tirgus nosacījumus, nenoteiktības un iespējas sadarboties ar potenciālajiem partneriem. Lai sasniegtu nosaukto mērķi, nepieciešams atrisināt šādus uzdevumus:

- optimizācijas stohastiskā modeļa un algoritma izstrāde un tā darbotiespējas pierādīšana hidroelektrostacijas vajadzībām;
- dabiskās ūdens pieplūdes prognoze ūdenskrātuvē īstermiņā un ilgtermiņā;
- elektroenerģijas cenu prognoze īstermiņā un ilgtermiņā;
- finansiāla izmaksu un ieguvumu analīze, kurā novērtēti iespējamie ienākumi no ieguldījumiem;
- izmaksu un ieguvumu analīzes rezultātu par kopējām projekta izmaksām ģenerēšanas jaudai un ūdenskrātuvju alternatīvām prezentēšana; ilgtermiņa scenārija izveide mazo hidroelektrostaciju realizējamībai, lai izvērtētu to īpatnības un atrastu vislabāko alternatīvu;
- kooperatīvo spēļu teorijas pieejas izmantošana, lai kvantificētu koalīciju kopējās neto ekonomiskās priekšrocības efektīvu sadalījumu;
- modeļa izveide Turcijas hidroelektrostaciju operatoru vajadzībām: nepieciešamās informācijas apjoma un tās resursu noteikšana; modeļu testēšana optimizācijas uzdevumu risināšanas gaitā; modeļu lietošanas iespēja tiek pierādīta, izmantojot kvaziņūtona metodi apvienojumā ar neironu tīkliem.

### **Pētījumu metodes un rīki**

Rezultāti tika iegūti, izmantojot metodes un datorprogrammatūru.

1. Ūdens caurplūduma un elektroenerģijas tirgus cenu prognozēšana, izmantojot mākslīgo neironu tīklu (MNT).
2. Kvaziņūtona metode, lai atrisinātu MHES resursu izmantošanas optimizācijas uzdevumu.
3. Spēļu teorijas kritēriji ar koalīciju spēļu pieeju, izmantojot Šeplija vērtību, lai iegūtu papildu ienākumus HES enerģijas ražotājiem.
4. Montekarlo metode peļņas novērtēšanas problēmas atrisināšanai.
5. Metodes iekšējās atdeves likmes (*IRR*) un pašreizējās neto vērtības (*NPV*) aprēķināšanas metodes MHES tehniski ekonomiskajam pamatojumam.
6. Rezultātu apstrāde un grafiska attēlošana, izmantojot *MS Excel* un *Matlab*.
7. Safas MHES piemēra tehniski ekonomiskā pamatojuma ekonomiskā daļa izstrādāta, izmantojot programmatūru *RetScreen*.

### **Promocijas darba novitāte un galvenie rezultāti**

Sniegtos zinātniskos jauninājumus raksturo šādi aspekti.

1. Tiek rūpīgi izpētītas maza mēroga hidroelektrostaciju un ūdenskrātuvju darbības, tās tiek identificētas un tiek pierādīta to izmantošanas iespēja režīmu optimizācijai, ieskaitot izmantošanu Turcijas energosistēmā.
2. Tiek atrisināta hidroelektrostaciju darbības nosacījumu optimizācijas problēma, izmantojot stohastisko pieeju.

3. Tiek prognozēts ūdens caurplūdums un tirgus cenas, izmantojot mākslīgo neironu tīklu.
4. Tiek pierādīta iespēja izmantot kvaziņūtona metodi ienākumu maksimizēšanas uzdevuma risināšanai (balstoties uz konkrētu MHES piemēru);
5. Tiek pierādīta iespēja izmantot Montekarlo metodi tehniski ekonomiskajam pamatojumam;
6. Ar MHES saistīto uzdevumu risināšanā tiek izmantota kooperatīvo spēļu metodika ar Šeplija vērtību; tas ļauj koalīcijas dalībniekiem gūt papildu ienākumus. Tiek apskatīta atbalsta shēma (ievadtarifs) hidroelektroenerģijai un, balstoties uz tirgus cenu izmaiņām, pierādīta nepieciešamība pēc darbības režīmu regulēšanas.
7. Pamatota metodika rentabilitātes analīzei, kas pielāgota tirgus nosacījumiem.

### **Promocijas darba praktiskā nozīme**

Šī darba rezultāti var kalpot par pamatu turpmākiem pētījumiem saistībā ar speciāliem programmēšanas moduļiem mazo hidroelektrostaciju darbības nosacījumu automatizētai pārvaldībai, kas iedrošina investorus maksimāli izmantot hidroloģiskos resursus. Izstrādātais matemātiskais modelis ļauj maksimizēt aktīvās jaudas ienākumus, darbojoties tirgus apstākļos. Tam ir ārkārtīgi liela nozīme attīstības valstu, piemēram, Turcijas, kuras hidroenerģētiskais potenciāls ir lielākais Eiropā, energosistēmās. Turklāt ir ļoti svarīgi arī nonākt pie pareizās atbildes projektu provizoriskajos tehniski ekonomiskajos pamatojumos. Tradicionālā izmaksu un ieguvumu analīze nav labi piemērota hidroelektrostacijām, jo tā balstās uz deterministiskiem pamatiem un neņem vērā elektroenerģijas cenu un ūdens caurplūduma vērtību ikstundas izmaiņas. Šajā darbā sniegta metodika, ar kuras palīdzību varam iegūt precīzu atbildi MHES izmaksu un ieguvumu analīzē.

### **Autora personiskais ieguldījums veiktajos pētījumos**

Hidroelektroenerģijas ražošanas optimizācijas uzdevuma un tehniski ekonomisko pamatojumu ekonomiskās daļas brīvā tirgus apstākļos izvēle par darba pamatu notika profesora Antana Sauhata vadībā. Stohastiskās pieejas verifikācija, kooperatīvo spēļu teorijas metodoloģijas adaptācija un Šeplija sadalījuma izstrāde notika kopā ar profesoru Antanu Sauhatu. Hidroelektroenerģijas režīma nosacījumu modelēšana un modeļu un nepieciešamo programmēšanas pieeju un prognozēšanas lietotņu izstrāde tika veikta kopā ar doktoru Romānu Petričenko. Visi aprēķini, ievaddatu savākšana un apkopošana, rezultātu verifikācija, kā arī secinājumi, pieder personiski autoram.

### **Darba tematika**

Lai arī pasaulē pastāv daudzas visu mērogu hidroenerģijas shēmas, tās tomēr ne tuvu nav izmantojušas visu pieejamo hidroenerģijas potenciālu. Pēdējo desmit gadu laikā, īpaši pēc enerģijas tirgū notikušās privatizācijas, Turcijas enerģētikas nozarē iesaistījušies daudzi privāti uzņēmumi. Šī darba tematika attiecas uz parametriem hidroelektrostaciju darbības nosacījumos.

1. Optimālo darbības politikas pasākumu identificēšana maza mēroga hidroelektrostacijām, atsevišķi aplūkojot Safas un Čobanlı elektrostaciju piemērus.
2. Stohastiskās metodes spējas izpēte atrast risinājumus optimālai darbībai un rezultātu salīdzināšana ar risinājumiem, kas iegūti ar klasisko deterministisko metodi.
3. Izstrādātās optimizācijas metodes efektivitātes analīze.
4. Modeļa izveide iepriekšminētajai ūdenskrātuves sistēmai, izmantojot kvaziņūtona metodi, ko piedāvā programmatūra *Matlab*.

Šajā darbā mēģināts sniegt vispārīgu priekšstatu par maza mēroga hidroelektrostaciju darbības režīmu tehniski ekonomiskās pamatotības novērtēšanu. Darbā tiek pētīti un ar solveru palīdzību salīdzināti divi dažādi darbības režīmi – ievadtarifs un darbība tirgus apstākļos. Šajos pētījumos ietilpst divu dažādu variantu novērtējums, kuros atšķiras ūdens ņemšanas konstrukcijas novietojums un līdz ar to atšķiras arī citi komponenti un kuros darbs notiek tirgus apstākļos vai pēc fiksētas cenas.



Programmatūras nozīmīgākie parametri norādīti gadījuma izpētē, un tiek salīdzināti dažādi varianti tehniski ekonomiskajam pamatojumam, kas ietver dažādus ūdenskrātuves izmērus un elektrostacijas jaudas īsam, vidējam un ilgam termiņam, lai veiktu jutīguma analīzi un atrastu labāko variantu.

### Promocijas darba aprobācija

Par rezultātiem tika ziņots un tie tika apspriesti šādās starptautiskās konferencēs.

1. A. Sauhats, R. Varfolomejeva, I. Umbrasko, **H.H. Coban**. The Small Hydropower Plant Income Maximization Using Games Theory. *Proceedings of the International Conference on Environment, Energy, Ecosystems and Development (EUROPMENT 2013)*. 28–30 September, 2013, Venice, Italy.
2. R. Varfolomejeva, M. Zima-Bočkarjova, A. Sauhats, I. Umbrasko, **H.H. Coban**. Reconsideration of Supporting Scheme for Renewable Energy Producer. *4<sup>th</sup> International Symposium on Environmental Biotechnology and Engineering*, September 9–12, 2014, Cinvestav, Mexico City, Mexico.
3. **H.H. Coban**, R. Varfolomejeva, A. Sauhats, I. Umbrasko. Hydropower Plant Regime Management According to the Market Conditions. *2<sup>nd</sup> International Congress on Energy Efficiency and Energy Related Materials (ENEFM)*, 16–19 October, 2014, Oludeniz, Turkey.
4. **H.H. Coban**, R. Varfolomejeva, A. Sauhats, I. Umbrasko. Small Hydropower Plants Operations Optimization in the Market Conditions. *IEEE 2<sup>nd</sup> Workshop on Advances in Information, Electronic and Electrical Engineering (AIEEE 2014)*. 28–29 November, 2014, Vilnius, Lithuania.
5. **H.H. Coban**, R. Varfolomejeva, A. Sauhats. Comparing and Optimizing Hydroelectricity Power Production Models, *Ecres–3, European Conference on Renewable Energy Systems*, 07–10 October, 2015, Antalya, Turkey.
6. **H.H. Coban**, R. Varfolomejeva. Decision-Making in the Development of Small Hydropower Plants Considering Energy Storage Capacity. *International Renewable Energy Storage Conference (IRES)*, 15–17 March, 2016, Düsseldorf, Germany.

Publikācijas starptautiski citējamās zinātnisko rakstu krājumos.

1. A. Sauhats, R. Varfolomejeva, I. Umbrasko, **H.H. Coban**. The Small Hydropower Plant Income Maximization Using Games Theory. *Proceedings of the 2013 International Conference on Environment, Energy, Ecosystems and Development (EUROPMENT 2013)*. Venice, Italy, pp. 152–157. ISBN: 978-1-61804-211-8.
2. A. Sauhats, R. Varfolomejeva, I. Umbrasko, **H.H. Coban**. An Additional Income of Small Hydropower Plants and a Public Trader. *International Journal of Energy*, Vol. 8, 2014, pp. 29–35. ISSN: 1998-4316.
3. R. Varfolomejeva, M. Zima-Bočkarjova, A. Sauhats, I. Umbrasko, **H.H. Coban**. Reconsideration of Supporting Scheme for Renewable Energy Producer. *4<sup>th</sup> International Symposium on Environmental Biotechnology and Engineering*, September 9–12, 2014, Cinvestav, Mexico City, Mexico, pp. 62–63. ISBN: 978-607-9023-24-9.
4. **H.H. Coban**, R. Varfolomejeva, A. Sauhats, I. Umbrasko. Hydropower Plant Regime Management According to the Market Conditions. *2<sup>nd</sup> International Congress on Energy Efficiency and Energy Related Materials, Springer Proceedings in Energy*, pp. 141–152. ISBN: 978-3-319-16901-9.
5. **H.H. Coban**, R. Varfolomejeva, A. Sauhats, I. Umbrasko. Small Hydropower Plants Operations Optimization in the Market Conditions. *IEEE 2<sup>nd</sup> Workshop on Advances in Information, Electronic and Electrical Engineering*, Vilnius, Lithuania, 2014. ISBN: 978-1-4799-7123-7; DOI: 10.1109/AIEEE.2014.7020328.
6. **H.H. Coban**, R. Varfolomejeva, A. Sauhats. Comparing and Optimizing Hydroelectricity Power Production Models. *Ecres–3 Proceedings. European Conference on Renewable Energy Systems*, 7–10 October 2015. ISBN: 978-605-86911-3-1.

7. A. Sauhats, **H.H. Coban**, K. Baltputnis, Z. Broka, R. Petrichenko, R. Varfolomejeva. Optimal Investment and Operational Planning of a Storage Power Plant. *International Journal of Hydrogen Energy*. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2016.03.0782016.

## Darba struktūra un apjoms

Darbs rakstīts angļu valodā, tam ir ievads, 5 nodaļas, secinājumi, ieteikumi turpmākam darbam un literatūras saraksts. Darbam ir 155 lappuses, 79 attēli, 18 tabulas un 2 pielikumi. Literatūras sarakstā ietilpst 148 avoti.

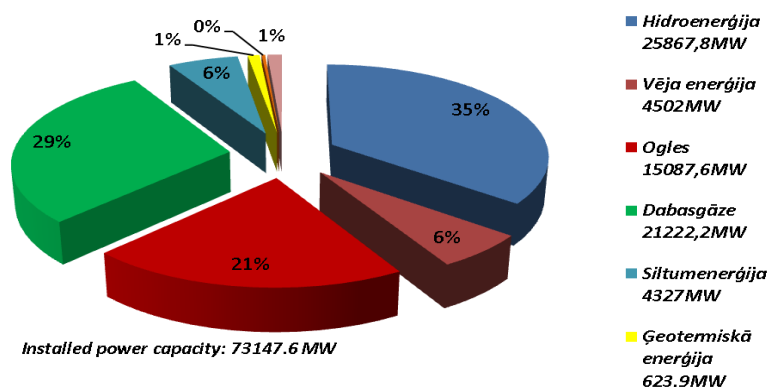
## 2. MHES ATTĪSTĪBAS PAMATI

Hidroelektrostaciju attīstības problēmu var formulēt saistībā ar nepieciešamību tiekties pēc plaši atzītiem pamatmērķiem — ilgtspējas [11], efektivitātes [12], drošuma [13], kā arī samazināt klimata izmaiņas ietekmējošos faktoros [14,15,16,17]. Iezīmēsim pasaules MHES darbības īpatnības, to tipus un attīstības stadijas.

### 2.1. Hidroenerģija pasaulē un Turcijā

Saskaņā ar neseniem datiem hidroenerģija veido aptuveni 20 % no pasaulē saražotā elektroenerģijas daudzuma un aptuveni 86 % no visa elektroenerģijas daudzuma, kas saražots no atjaunīgiem avotiem. Hidroenerģija veido vairāk par 50 % no visa valstī saražotā elektroenerģijas daudzuma apmēram 65 valstīs, bet vairāk par 80 % — 32 valstīs [14,18]. Eiropas Komisija ir ieviesusi nepieciešamos normatīvos aktus Eiropas Savienības stratēģijas ietvaros atjaunīgās enerģijas daļas palielināšanai iekšzemes bruto enerģijas patēriņā līdz 20 % līdz 2020. gadam [19]. Iebildums tādēļ ir skaidrs: neizbēgams enerģijas patēriņa pieaugums pasaulē ar klimata izmaiņām, globālo sasilšanu un ietekmes uz vidi risku, ko izraisa fosilā kurināmā izmantošana [18].

Turcija ir kalnaina valsts, kas atrodas Āzijas un Eiropas krustcelēs, ar daudzu upju baseiniem, to skaitā Tigras un Eifratas upju, kuras plūst caur vairākām valstīm. Turklāt paredzams, ka nākamo desmit gadu laikā elektroenerģijas pieprasījums pieaugs par vairāk nekā 90 %, kas ir iemesls, kāpēc ir nepieciešams parūpēties par hidroenerģētikas attīstību [20]. Turcijas tehniskais hidroenerģētiskais potenciāls veido 1,5 % no pasaules tehniskā potenciāla, savukārt Eiropas tehniskais potenciāls veido 17,6 %, kas atbilst 440 teravatstundām. Nākamajā attēlā parādīts valsts uzstādītās jaudas resursu sadalījums 2015. gada beigās.



2.1. att. Turcijas uzstādītās jaudas sadalījums pa resursu tipiem [21].

Turcijai ir lielākais hidroenerģijas potenciāls Eiropā — tās tehniski realizējama hidroenerģijas potenciāls ir 216 TWh gadā, taču 2005. gadā tas tika izmantots tikai 18,3 % apmērā (39,6 TWh). Savukārt vairākas Eiropas valstis, piemēram, Norvēģija, Zviedrija un Francija, cenšas panākt to ekonomiski pamatotā hidroenerģijas potenciāla izmantojumu 65 % līdz 100 % apmērā [22].

Turcijas valdība garantē ģenerētās elektroenerģijas iepirkumu 10 gadiem, piedāvājot ievadtarifu 7 dolāru (6,2 eirocenti) apmērā par kilovatstundu. Likumā arī paredzēts papildu bonusa ienākums par katru iekšzemē izgatavotu elektromehānisko iekārtu vienību, kas tiek izmantota energoobjektos.

## 2.2. MHES tehnoloģiju pārskats

Hidroelektroenerģijas ražošanas shēmās parasti tiek izmantotas uzkrāšanas elektrostaciju, caurteces elektrostaciju un hidroakumulācijas elektrostaciju tehnoloģijas [23].

**Caurteces hidroenerģijas** projektos tiek izmantots tikai tas ūdens, kas ir pieejams upes dabiskajā plūsmā, bez ūdens uzkrāšanas, līdz ar to saražotās elektroenerģijas daudzums svārstās līdz ar ūdens caurplūdumu. Dažām dabiskā režīma elektrostacijām var vispār nebūt uzkrāšanas vai arī ierobežots uzkrāšanas apjoms; šī veida stacijām ūdenskrātuve satur salīdzinoši nelielu ūdens daudzumu aiz aizsprosta, kas tiek izmantots upes ūdens caurplūduma īstermiņa (ikdienas) regulēšanai [24].

**Uzkrāšanas (ūdenskrātuvju) projekti** kā lieli hidroenerģētikas projekti ir pievilcīgi, jo tie pīķa slodzes periodos var piedāvāt „uzglabāto” enerģiju. Jauni aizsprosti ūdenskrātuvēm mazām hidroelektrostacijām vairumā gadījumu nav ekonomiski pamatoti, izņemot izolētus rajonus, kur elektroenerģijas cena var būt ļoti augsta [25].

**Hidroakumulācijas elektrostacijas** ļauj izmantot ārpus pīķa stundām saražoto elektroenerģiju, lai iesūknētu ūdeni no zemāk esošas ūdenskrātuves vai no upes augstāk esošā ūdenskrātuvē, lai ražotu elektroenerģiju un izdotu ūdeni pīķa periodos. Hidroakumulācijas sistēmām ir 2 ūdenskrātuves — apakšējā un augšējā. Kad enerģijas pieprasījums ir augsts vai elektroenerģijas cenas ir augstākas, elektroenerģiju ražo augšējā ūdenskrātuvē uzkrātais ūdens, un apakšējā ūdenskrātuvē uzkrājas atūdens. Brīžos, kad enerģijas pieprasījums vai elektroenerģijas cenas ir zemi, ūdens līmenis tiek paaugstināts, sūknējot tekošu ūdeni no zemākās ūdenskrātuves uz augstāko ūdenskrātuvi [26].

**Objekti, kuros izmantoti pastāvošie ūdens tīkli**, var izmantot tīklus, kas būvēti apūdeņošanai, dzeramajam ūdenim vai pat kanalizācijai. Pastāvošo tīklu izmantošanas priekšrocība ir tāda, ka sākotnējās izmaksas ir zemākas salīdzinājumā ar citiem objektiem. Tādām valstīm kā Japāna un Turcija var nebūt lielu fosilā kurināmā rezervju, bet tās var apsvērt šādas alternatīvas [27].

## 2.3. MHES attīstības stadijas

Principā MHES attīstībā ietilpst 2 galvenie etapi.

1. Projekta formulēšana un plānošana. Tā notiek pirms īstenošanas stadijas, un ir nepieciešams izstrādāt pārskatu, kurā ietilpst visa izpēte, datu ievākšana, tehniski ekonomiskais pamatojums, risku analīze un izmaksu un ieguvumu analīze.
2. Projekta izpilde. Tiek pieņemts lēmums virzīties tālāk uz projekta īstenošanu, izvēloties labāko variantu, balstoties uz tehniski ekonomisko pamatojumu.

Darbs jāsāk ar plānošanu un datu avotu savākšanu. Hidroenerģētisko resursu izvērtēšana prasa vairāku veidu datus, to skaitā ziņas par ūdensšķirtnēm, upju ģeometriju, topogrāfiju un pieejamo ūdens daudzumu. Šie dati ļauj novērtēt divus hidroenerģijas ražošanai izšķiroši svarīgus mainīgos: neto spiedienaugstumu un aprēķina caurplūdumu. Tālāk norādīti MHES tehniski ekonomiskā pamatojuma etapi:

- 1) datu savākšana un pārskatīšana. Tiek sagādāta dokumentācija attiecībā uz projekta nepieciešamību (ūdens piegādes problēma un tās risinājums) un ietekmi (sociālo ietekmi un ietekmi uz vidi);
- 2) enerģētiskā potenciāla noteikšana un izdodamā enerģijas daudzuma novērtēšana;
- 3) variantu izstrāde, tehniski ekonomiskais pamatojums (labākais projekta variants);

- 4) tirgus potenciāla novērtēšana;
  - 5) aptuveno izmaksu tāme;
  - 6) ekonomiskā analīze un variantu izvēle: ekonomiskā, finansiālā un institucionālā pamatotība.
- Finansiālā programma — aizņēmuma atmaksāšanas spēja un drošība.

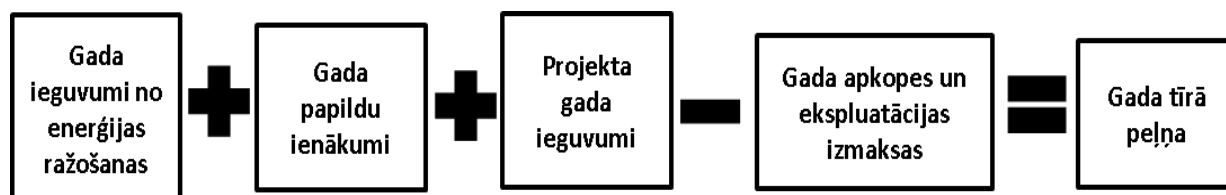
Var izmantot projektēšanas programmatūru, vai nu lai izstrādātu reālus hidroenerģētikas projektus, vai arī tehniski ekonomisko pamatojumu izstrādei, pēc kā tiek veidots galīgais projekts vai uzsākta būvniecība. Pieejami ir vairāki programmatūras [28, 29] rīki — *Hydropower Evaluation*, *Smart Mini Hidro*, *HydroHelp*, *Bentley*, *RetScreen* — kas var palīdzēt MHES projektu novērtēšanā.

## 2.4. Risināmās problēmas

Veiktais tehnoloģiju, metožu un rīku pārskats ļauj mums izdalīt risināmās problēmas.

Vieni no galvenajiem **MHES attīstības metodiku atkārtotas pārskatīšanas** iemesliem ir: enerģijas tirgus pastāvēšana, revolūcija komunikāciju sfērā, kā arī attīstības nepieciešamība lauku apvidos. Nepieciešams arī piedāvāt atbalsta mehānismu, kas ļauj pielāgot elektrostacijas darbību situācijai tirgū. Nepieciešams izveidot koalīciju starp hidroelektrostacijām un publisko tirgotāju. Minētās koalīcijas izveide nav pretrunā ar likuma normām. Elektrostacijas darbības režīms tiks pielāgots visu iesaistīto pušu interesēm, kā arī pašreizējai situācijai tirgū. Lai panāktu taisnīgu papildu peļņas sadali, var izmantot kooperatīvo spēļu teorijas pieejas, proti, Šeplija vērtību.

**Izmaksu un ieguvumu analīze (IIA)** [30] ir tehniski ekonomiskā pamatojuma galvenā sastāvdaļa. Naudas izteiksmē tiek noteiktas izmaksas un ieguvumi, kādi radīsies visā investīciju projekta dzīves cikla laikā. Nākotnes ieguvumu un izmaksu pašreizējās vērtības noteikšanai tiek izmantota diskontēšana. Nozīmīgā lēmuma likums IIA tādēļ balstās uz to, vai ieguvumu pašreizējā vērtība ir vienāda ar izmaksu pašreizējo vērtību vai lielāka par to; tādā gadījumā tiek uzskatīts par pieļaujamu investēt. 2.2. attēlā redzams peļņas aprēķināšanas ekonomiskās metodikas pārskats.



2.2. att. MHES gada ienākumu aprēķināšanas metodikas pārskats.

Lai novērtētu gada tīro ieguvumu apjomu, no ienākumiem, ko veido bruto saražotās enerģijas apjoms, projekta pakalpojumi un papildu ienākumi, tiek atņemti izdevumi – objekta ekspluatācija un apkope. Gada ieguvumi no enerģijas ražošanas atspoguļo neradušās izmaksas, kādas būtu saistītas ar objekta ģenerēšanas jaudas un garantētās jaudas aizstāšanu ar enerģiju un tikpat augsta drošuma jaudu no alternatīva avota. Papildu ikgadējie ieguvumi saistīti ar atrašanos koalīcijā ar citiem enerģijas ražotājiem, zvejniecību, apūdeņošanu. Attiecībā uz ikgadējiem ieguvumiem, kas saistīti ar projekta pakalpojumiem, daži hidroelektriskie projekti var sniegt tādus ieguvumus kā aizsardzība pret applūšanu, ūdensapgāde, apūdeņošana un upju kuģojamība [31]. Daudzos gadījumos, lai novērtētu izmaksas un ieguvumus, tiek izmantoti ekonomiski kritēriji, piemēram, **pašreizējā neto vērtība (NPV)** un **iekšējā atdeves likme (IRR)**.

## 2.5. Sadarbības iespējas un papildu peļņas sadalījums

Iedzīvotāju izmantotās elektroenerģijas pieprasījums mainās diennakts gaitā, kā arī no gadalaika uz gadalaiku. Piemēram, no rīta, kad cilvēki mostas un sāk izmantot sadzīves elektroierīces, elektroenerģijas patēriņš ir lielāks. Tāpat vairāk elektroenerģijas tiek patērēts aukstās ziemas dienās un karstās vasaras dienās, kad vērojams sildītāju vai gaisa kondicionētāju izmantošanas maksimums. Hidroenerģija un saules enerģijas resursi lielā mērā ir sezonāli viens otru aizstājoši un bieži vietējos

tīklos un nelielās pilsētās var nodrošināt objektu ar enerģiju bez nepieciešamības pēc rezerves ģeneratora.

Zināma jēga ir hidroenerģijas kombinēšanai ar vēja enerģiju. Saskaņā ar vislabāko apstākļu shēmu, piemēram, laikā, kad darbojas vēja turbīnas, hidroelektrostacijas ūdenskrātuvē iespējams uzkrāt lielāku ūdens daudzumu. Ūdeni no šīm ūdenskrātuvēm var izmantot, lai saražotu vairāk elektroenerģijas, kad vēja stiprums ir mazs [15,32,33].

Kaskādē esošām hidroelektrostacijām saimnieciska ūdens izmantošana atbilstošos apstākļos sniegs jūtamu ekonomisku efektu. Lai gan nav iespējams prognozēt upes ūdens caurplūdumu, zemāk pa straumi esošās HES saražotais enerģijas daudzums, kas iegūts, optimizējot augstāk pa straumi esošās HES agregātu vadību, nozīmē, ka ekonomiskais efekts var būt jūtams [34].

Veiktais pārskats ļauj secināt, ka parasti MHES var ražot elektroenerģiju ne tikai elektroenerģijas tirgum. Elektroenerģiju var patērēt vietējie mazpilsētu patērētāji vai jebkurš vietējais komunālo pakalpojumu uzņēmums. MHES darbības režīms var ietekmēt to uzņēmumu peļņu, kuri izmanto ūdeni no ūdenskrātuvēm (zvejniecības un lauksaimniecības uzņēmumi, kaskādē izvietotas MHES). Ņemot vērā šo saistīto uzņēmumu intereses, ir iespējams gūt papildu ienākumus. Taču rodas jauna problēma: vairumā gadījumu uzņēmumiem un MHES ir dažādi īpašnieki, tomēr atbilstoši MHES darbībai uzņēmumu intereses pārsvarā rada papildu ienākumus un samazina MHES izdevumus. Ienākumu sadalījumam jābūt taisnīgam.

### 3. MHES PROJEKTĒŠANAS UN EKSPLUATĀCIJAS PAMATI

Hidroenerģijas objektu darbību nosaka dažādi nosacījumi un ierobežojumi, kuru apvienojums nosaka īstenojamo risinājumu telpu, kuri atbilst visiem kritērijiem un noteicošajiem jēdzieniem. Nosacījumus var iedalīt trīs grupās: juridiskie, tehniskie un ekonomiskie. Juridiskie nosacījumi pamatā ietver noteikumus, kādi jāievēro investēšanas gadījumā. Šī grupa ir vislielākā, jo tajā ietilpst visi dažādie ekoloģiskie, sociālie un citi aspekti un noteikumi, kurus nodrošina normatīvie noteikumi. Vienā ziņā juridiskie nosacījumi nosaka arī pārējās divas nosacījumu grupas, jo notiek arī tehnoloģisko un ekonomisko aspektu regulēšana, lai novērstu nepieļaujamu izmantošanu vai risku iesaistītajām pusēm, kas saistīts ar resursu pārvaldību, lēmumu pieņemšanas procesu, iepirkumiem u.c. [35]. Tehniskie un ekonomiskie nosacījumi ir svarīgi, lai varētu projektēt shēmas, kurām piemīt elastība, lai pielāgotos sociāli ekonomisko un vides prasību izmaiņām, tirgus nosacījumiem un mainīgām tehnoloģijām.

#### 3.1. Optimizācijas problēmas formulējums un risināšanas algoritma struktūra

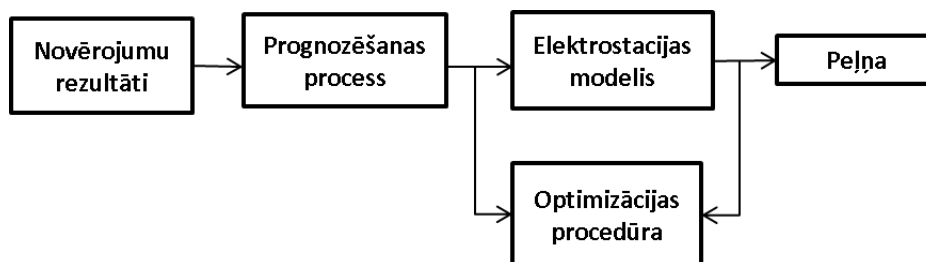
Šīs apakšnodeļas mērķis ir noteikt mazo hidroenerģētikas objektu izmaksas veidojošos faktoros, veicot izmaksu analīzi. Lai atrisinātu darbības apstākļu optimizācijas uzdevumu, situācijas atspoguļošanai izveidojam matemātisko modeli. Aplūkosim MHES darbības režīmus no optimizācijas uzdevumu viedokļa gan īstermiņa, gan ilgtermiņa plānošanā. Abiem uzdevumiem piemīt gan kopīgas, gan atšķirīgas iezīmes:

- abiem uzdevumiem kā galveno mērķi var formulēt peļņas maksimizāciju;
- risinājumi jāveido, balstoties uz procesu prognozēšanu;
- optimizācijas procedūras abos gadījumos var būt nelineāras un tādas, kas spēj ņemt vērā lielu lēmumu mainīgo un stāvokļa mainīgo skaitu;
- mērķa funkcija var saturēt gadījuma un nenoteiktus mainīgos.

Tajā pašā laikā varam vērot būtiskas atšķirības:

- tehniski ekonomisko pamatojumu plānošanas laika horizonts ir daudz lielāks;
- lēmuma mainīgo skaits tehniski ekonomiskajos pamatojumos ir daudz lielāks, jo to skaitā ietilpst mainīgie, kuri apraksta ar elektrostacijas būvi saistītus parametrus.

Neraugoties uz pastāvošajām atšķirībām, abus uzdevumus iespējams attēlot ar algoritmu, kam ir viena un tā pati struktūra. 3.1. attēlā redzama vispārinātu optimizācijas uzdevumu principiālā struktūra.

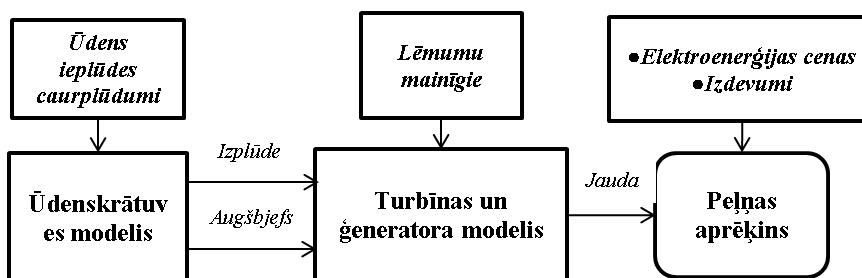


3.1. att. Vispārināto MHEC optimizācijas uzdevumu struktūra.

Ar šādu struktūru iespējams atrisināt aplūkojamās MHEC peļņas aprēķināšanas uzdevumu. Šajā darbā pētītas un salīdzinātas 2 pieejas. Pirmā no tām ir klasiskā metode, kas balstīta uz deterministisku pieeju; šajā gadījumā ir neiespējami iegūt precīzu atbildi optimizācijas procedūrai un tehniski ekonomiskajiem pamatojumiem, neņemot vērā nenoteiktību. Otrā metode ir sarežģītāka, bet precīzāka, proti, stohastiskā pieeja, kuru iespējams izmantot ienākumu aprēķiniem, kas ietver mainīgo neprognozējamību. 3.2. attēla struktūra satur 3 pamatblokus, kurus nepieciešams analizēt, proti: prognozēšanas procesu, MHEC ekspluatācijas apstākļu optimizāciju un elektrostacijas peļņas aplēšanu.

### 3.2. Elektrostacijas modelis

Izanalizēsim elektrostacijas modeli; tā struktūra attēlota 3.2. attēlā un satur 3 pamatblokus. Pirmais bloks attēlo ūdenskrātuves modeli, kas ataino ūdenskrātuves tipu un akumulācijas spēju un kas būs paskaidrots 4. nodaļā. Atbilstošā turbīnas un ģenerators tipa izvēle atkarīga pirmām kārtām no pieejamā augšbjefa augstuma un ūdens caurplūduma. Otrais bloks ir turbīnas/turbīnu un ģenerators/ģeneratoru modelis, kas parasti izmanto matemātiskās optimizācijas paņēmienus, kuros ņemti vērā ierobežojumi. Pēdējais bloks ataino peļņas aprēķinu, kur pieņemta konkurence par tirgū balstīto elektroenerģijas cenu, un izmaksas, kas tālāk paskaidrotas 4. nodaļā.



3.2. att. Elektrostacijas modeļa struktūra.

Reālos apstākļos elektrostacijas modeli iespējams sintezēt tad, kad izvēlētas konkrētas iekārtas. Sīkākas ziņas par izdotās jaudas aprēķināšanu sniegtas 5. nodaļā.

### 3.3. Vispārīgais matemātiskais programmēšanas uzdevums

Pieņemsim, ka elektrostacijas īpašnieka peļņa ir jebkāda funkcija no cenām, ūdens caurplūduma, ģeneratoru jaudas utt. un to iespējams aprakstīt šādi:

$$R_{i\Delta} = \varphi(P_{it}, U_{it}, H_{it}, C_t, A_{it}, \rho_{it}, OM_t, D_t, K_t, CH_t, Inv_t) \quad (3.1)$$

kur  $R_{i\Delta}$  — elektrostacijas peļņa. Mēs pieņemam, ka elektrostacijas tiecas to maksimizēt;  $t$  — laika intervāls, gadi;  $P_{it}$  — uzstādītā jauda;  $U_{it}$  — bloku skaits;  $H_{it}$  — augšbjefa augstums, m;  $C_t$  — elektroenerģijas tirgus cenas, €/MWh;  $A_{it}$  — ūdenskrātuves tilpums,  $m^3$ ;  $\rho_{it}$  — turbīnas un

ģeneratoru lietderības koeficients;  $OM_{it}$  — ekspluatācijas un apkopes izmaksas gadā  $t$ ;  $D_t$  — risku koeficients gadam  $t$ ;  $K_t$  — diskontēšanas koeficients gadam  $t$ ;  $CH_t$  — baseins,  $\text{km}^2$ ;  $i$  — elektrostacijas būvniecības varianta (alternatīvas) numurs;  $Inv_t$  — būves izmaksas, kas ir cieši saistītas ar projektu un būvniecības parametriem.

Deterministiskajā gadījumā visi ievadāmie parametri ir zināmi. Savukārt stohastiskajā gadījumā daži no šiem parametriem ir varbūtisks un/vai nenoteikts raksturs. Šajā gadījumā arī  $R_{i\Delta}$  ir gadījuma vērtība. Optimizācijas uzdevumu var formulēt kā vidējās peļņas maksimizācijas uzdevumu šādā formā:

$$M[R_{i\Delta}] = \Delta t \int_{-\infty}^{+\infty} \dots \int \varphi(P_{it}, U_{it}, H_{it}, C_t, A_{it}, \rho_{it}, OM_t, D_t, K_t, CH_t, Inv_t) dF \quad (3.2)$$

kur  $F$  — varbūtības sadalījuma funkcija ar vairākiem mainīgajiem [10, 36]. Attēlota formā (3.2), mērķa funkcija ir ne tikai grūti maksimizējama, bet pat tās aprēķināšana ir ļoti sarežģīta.

### 3.4. MHES darbības ierobežojumi

Izanalizēsim un formulēsim ierobežojumus, kuri būtu jāņem vērā vispārīgajā optimizācijas modelī vairākperiodu hidroenerģētiskās ūdenskrātuves un ģenerācijas darbībai. MHES darbības galvenos ierobežojumus iespējams klasificēt, sadalot 4 grupās.

#### 1. Ūdenskrātuves uzglabāšanas tilpuma ierobežojumi.

Augšbjefa augstums būtībā ietver augstuma atzīmes atšķirību starp ūdenslīmeni augšpus aizsprosta un leļpus tā. Pieņemam, ka  $H$  var būt jebkura vērtība intervālā  $[H_{min}, H_{max}]$ , kur  $H_{min}, H_{max}$ , ir pozitīvas konstantes, kas noteiktas ekspluatācijas plānā [37].

$$H_{i,min}^t \leq H_i^t \leq H_{i,max}^t \quad \forall i \in I, \forall t \in T \quad (3.3)$$

kur  $H$  ir ūdens līmenis; vērtības ar atzīmēm  $min$  un  $max$  ir attiecīgi pieļaujamais zemākais un augstākais līmenis laikā  $t$ .  $H_i$  ir ūdenskrātuves līmenis perioda  $t$  sākumā;

$$H_i^t + A_i^t - Q_i^t = H_i^{t+1} \quad (3.4)$$

$$H_i^t = H_i^{t-1} + \sum_{t=1}^T A_i^t - \sum_{t=1}^T Q_i^t \quad (3.5)$$

$$H_{i,max}^t \geq H_i + \sum_{t=1}^T A_i^t - \sum_{t=1}^T Q_i^t \geq H_{i,min}^t \quad \forall i \in I, \forall t \in T \quad (3.6)$$

kur  $I, i$  — ūdenskrātuves kopa un indekss;  $T, t$  — stundu kopa un indekss laika horizontā;  $H_i^t$  — ūdens līmenis stundā  $t$ ;  $A_i^t$  — ūdens caurplūdums uz ūdenskrātuvi stundā  $t$ ;  $Q_i^t$  — ūdens izplūde stundā  $t$ .

Ūdens caurplūdums uz aizsprosta  $A$  ir pozitīvs mainīgais. Ūdens līmeņu attiecību iespējams pārformulēt kā summu no sākuma līmeņa papildījuma un ienākošā caurplūduma, no kuras atņemta izplūde no perioda 1 līdz periodam  $T$  turpmāk aprakstītā veidā.

#### 2. Ūdenskrātuves ūdens izplūde.

Par ūdens izplūdi sauc caur turbīnu plūstošā ūdens caurplūdumu. Pieņemam, ka  $Q$  var būt jebkura vērtība apgalā  $[Q_{min}, Q_{max}]$ , kur  $Q_{min}$  ir 0 un  $Q_{max}$  nosaka turbīnas spiedienaugstums. Zemākajai ūdens izplūdes no ūdenskrātuves robežai ir jābūt tādai, lai apmierinātu vajadzības, kas saistītas ar apgabalu leļpus elektrostacijas, piemēram, kuģniecību un vides aizsardzību, savukārt izplūdes augšējā robeža tiek noteikta kā ūdenskrātuves maksimāli pieļaujamā izplūde, kā redzams tālākajā vienādojumā:

$$Q_{i,\min}^t \leq Q_i^t \leq Q_{i,\max}^t \quad \forall i \in I, \quad \forall t \in T \quad (3.7)$$

kur  $Q_{\min}$  un  $Q_{\max}$  ir attiecīgi ūdens izplūdes apakšējā un augšējā robeža. Mūsu aplūkotajā piemērā tiek uzskatīts, ka minimālā ūdens izplūde ir neievērojama.

### 3. Elektroenerģijas ražošana.

$P$  ir funkcija no ūdenskrātuves izplūdes  $Q$  un ūdens spiedienaugstuma  $\Delta H$ :

$$P_i^t = n_i^t Q_i^t \Delta H_i^t \quad \forall i \in I, \quad \forall t \in T \quad (3.8)$$

$$0 \leq P_i^t \leq P_{i,\max}^t \quad \forall i \in I, \quad \forall t \in T \quad (3.9)$$

kur  $n_i^t$  — elektrostacijas lietderības koeficients stundā  $t$ ;  $\Delta H_i^t$  — ūdenskrituma vertikālais attālums, augšbjefa augstums stundā  $t$ ;  $P_{i,\max}^t$  — maksimālais saražotās enerģijas daudzums stundā  $t$ .

### 4. Minimālais bloka saražotais apjoms.

Minimālais saražotais apjoms jānosaka kā zināms procents no katra bloka maksimālā saražotā apjoma, ņemot vērā kavitāciju un turbīnas un ģenerators lietderības koeficientu.

$$\%R \cdot P_{i,\min}^t \leq P_i^t \leq P_{i,\max}^t \quad (3.10)$$

kur  $R$  rāda minimālo katra bloka saražotās elektroenerģijas apjomu.

## 3.5. Mērķa funkcijas

**Deterministiskā pieeja.** Lai maksimizētu saražotās elektroenerģijas apjomu, liekot to par vienu no darbības mērķiem, to panāk, izmantojot ūdens spiedienaugstumu saražotā elektroenerģijas apjoma palielināšanai, samazinot zaudētā ūdens daudzumu. Izmantojot šo metodi, elektroenerģijas cenas ir konstantas; tādējādi vienīgais veids, kā maksimizēt ienākumus, ir paaugstināt saražotās elektroenerģijas apjomu.

Optimizācijas uzdevumu iespējams formulēt šādi:

$$R = \text{Max}(E(\vec{Q}) \cdot c - Ex) \quad (3.11)$$

kur  $E$  — ikgadējais ģenerators saražotais elektroenerģijas daudzums,  $c$  — konstanta elektroenerģijas cena €/kWh,  $Ex$  — izdevumi, proti, ekspluatācijas un apkopes izdevumi un procentu maksājumi. Saskaņā ar vienādojumu (3.11) lēmumu mainīgais ir izdotās hidroenerģijas daudzums, kas atkarīgs no ūdenskrātuves izplūdes, kas ir lēmumu mainīgais  $P_i$ .

**Stohastiskā pieeja.** Peļņas maksimizācija. Tirgus apstākļos optimizācijas uzdevumu var formulēt šādi:

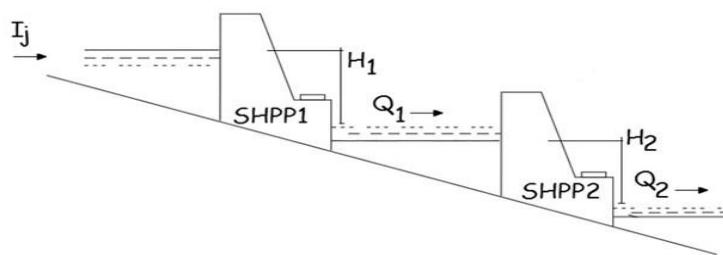
$$M[R(P_1, P_2, \dots, P_j)] = M \left[ \sum_{j=1}^J R_j(c_j, P_{\text{SHPP } j}) \right] \rightarrow \max \quad (3.12)$$

kur  $M$  — vērtības matemātiskā cerība;  $P_{\text{SHPP}}$  — MHES saražotā enerģija, kWh;  $P_j$  — enerģija, kas saražota laikā  $j$ ;  $c_j$  — gadījuma tirgus cena laika periodā  $j$ , €/kWh;  $Q_j$  — gadījuma ūdens ieplūde caur turbīnu, m<sup>3</sup>/s.  $R_j(c_j, P_j)$  — no elektroenerģijas realizācijas iegūtā peļņa.

Nepieciešams noteikt MHES darbības grafiku, nodrošinot maksimālus ienākumus regulēšanas ciklam.

**Mērķa funkcija MHES optimizācijas kaskādei.** Galvenā mērķa funkcija kaskādes HES darbības optimizācijai izpaužas peļņas palielināšanā un tādas darbības nodrošināšanā, kur lietderības koeficients ir visaugstākais. Attēlā 3.3. var redzēt divu MHES kaskādi.





3.3. att. Divu MHES kaskāde [38].

Optimizācijas jautājums kļūst sarežģītāks gadījumā, kad kaskādē ietilpstošās elektrostacijas pieder dažādiem īpašniekiem. Dabiski ir pieņemt, ka katrs īpašnieks cenšas palielināt savu peļņu. Augstāk esošā elektrostacija kaskādē ir neatkarīga un spēj izvēlēties labāko darbības režīmu. Turpretī zemāk pa straumi esošajām elektrostacijām jādarbojas, ņemot vērā iepriekšējo staciju ūdens ieplūdes caurplūdumus. Katrs no īpašniekiem cenšas maksimizēt savu peļņu. Pēdējās kaskādē ietilpstošās elektrostacijas peļņu ietekmē iepriekšējās elektrostacijas. Tālāk izklāstītas optimizācijas uzdevuma formulēšanas iespējas.

1. Elektrostacija darbojas neatkarīgi. Šajā gadījumā uzdevumu iespējams aprakstīt šādi:

$$R_1 \rightarrow \max, R_2 \rightarrow \max, \dots \quad (3.13)$$

2. Visi elektrostaciju īpašnieki ir vienojušies izveidot koalīciju. Optimizācijas uzdevumu iespējams aprakstīt šādi:

$$\sum_{i=1}^I R_i \rightarrow \max \quad (3.14)$$

Šāda vienošanās ir iespējama tikai tādā gadījumā, ja ir patiesa sekojošā nevienādība.

$$(\sum_{i=1}^I R_i)_{\max} > R_{1\max} + \dots + R_{I\max} \quad (3.15)$$

Šādā situācijā ne tikai tiek gūta papildu peļņa, bet arī rodas jauns jautājums. Šis jautājums reālos apstākļos ir ļoti nozīmīgs, proti, kā taisnīgi sadalīt papildu peļņu. Šī problēma tiks paskaidrota nākamajā apakšnodaļā.

### 3.6. Sadarbība. Šeplija sadalījuma modelis kaskādes elektrostacijām

Kā aprakstīts 2.5. apakšnodaļā, iespējams definēt daudzus gadījumus, kur iesaistīta sadarbība, tādēļ iespējams izmantot spēļu teoriju taisnīgai ienākumu sadalei, konkrēti — Šeplija sadalījumu [29,49]. Spēle ietver vairākus spēlētājus, no kuriem katram ir vairākas stratēģijas, kuras tie var izmantot pēc veiktajām izvēlēm. Spēļu teorija ir matemātiska metode, kuru izmanto katra spēlētāja stratēģiju analīzei, lai maksimizētu katra spēlētāja iespēju uzvarēt (mūsu gadījumā — maksimizētu ienākumus), un iespējamo spēles seku prognozēšanai. Pieņemsim, ka enerģijas piegādes plānošanas projektam ir statistiskas spēles forma ar pilnīgu informāciju [39].

$$\{I, S = \prod_i \{S_i\} | i \in I, R = \{R_1, R_2, \dots, R_n\}\} \quad (3.16)$$

kur  $I$  ir spēlētāju saraksts,  $\{S = \prod_i \{S_i\} | i \in I$  atspoguļo visas situāciju kombinācijas un katra spēlētāja ieņēmumus  $R$  pie visām viņa stratēģijām un visām konkurentu stratēģiju kombinācijām.

Šeplija vērtība ir likums, pēc kura vadās, izmaksājot spēlētājiem viņu daļu atbilstoši viņu ieguldījumam koalīciju spēlēs ar pārnesamu labumu. Starp enerģijas ražotājiem vai starp enerģijas ražotājiem un publisko tirgotāju ir iespējamās koalīcijas, jo tiek pieņemts, ka spēlētāji veic efektīvas sarunas savā starpā [40].

Koalīcijas spēles formulēšanas rezultātu iespējams definēt matemātiski tālāk norādītajā formā. Spēlētāja  $i \in N$  marginālais ieguldījums koalīcijā  $S$ ,  $i \in S$ :

$$v(S \cup \{i\}) - v(S) \quad (3.17)$$

Vienkāršākā pieeja būtu izmaksāt katram spēlētājam viņa ieguldījumu  $c_i$ :

$$c_i = R(S \cup \{i\}) - R(S) \quad (3.18)$$

kur  $R(S)$  — koalīcijas  $S$  ieņēmumi;  $R(S \cup \{i\})$  — koalīcijas  $S$  ieņēmumi, piedaloties dalībniekam  $i$ . Tā kā spēlētāji var izveidot  $n!$  dažādus sakārtojumus,  $i$ -tā spēlētāja iegūtais papildu ienākums/peļņa ir šāds:

$$\phi_i = \sum_{i \in S \subseteq N} \frac{|S|!(n-1-|S|)!}{n!} (R(S \cup \{i\}) - R(S)) \quad (3.19)$$

kur  $n$  — kopējais spēlētāju skaits;  $|S|$  ir kopas  $S$  izmērs, summa ietver visas  $N$  apakškopas  $S$ , kas neietver spēlētāju  $i$ .

Saskaņā ar Šeplija vērtību kooperācijas rezultātā iegūtā taisnīgi sadalītā peļņa, spēlē piedaloties diviem dalībniekiem, iegūst šādu vienkāršāko iespējamo formu;

$$\phi_1 = \phi_2 = (R(S \cup \{i\}) - R(S))/2 \quad (3.20)$$

Pastāv iespējas iegūt papildu ienākumus no koalīcijas izveidošanas starp MHES vai ar publisko tirgotāju. Divas no tām apkopotas turpmāk.

1. Publiskais tirgotājs motivē MHES darboties atbilstoši tirgus cenu grafikam saskaņā ar ievadtarifu un daļa šos papildu ienākumus ar MHES. Šāda pieeja var nest papildu ienākumus enerģijas ražotājiem un publiskajam tirgotājam.
2. Kaskādē izvietotām elektrostacijām zemāk izvietotās stacijas ekspluatētājs nevar izprast augstāk izvietotās stacijas ģenerācijas plānu, un tam nav iespējas prognozēt ūdens caurplūdumu. Kaskādē izvietotās elektrostacijas var izveidot koalīciju un strādāt sadarbojoties, lai palielinātu savus ienākumus.

#### 4. ALGORITMA SINTĒZE MHES OPTIMIZĀCIJAI UN TEHNISKI EKONOMISKAJAM PAMATOJUMAM

Šī nodaļa aplūko uzdevumu, problēmu aprakstīšanu, tiecoties pēc precizitātes un efektivitātes. Pieņemsim, ka energosistēmā ietilpst ģenerējošie uzņēmumi  $G_{com}$ , elektrotīkls  $P_{net}$  un patērētāji  $C_{ons}$ :

$$Own(G_{com}, P_{net}, C_{ons}) \quad (4.1)$$

Visumā katra no šīm grupām ietver daudzus objektus, kuru darbību vada dažādi īpašnieki:

$$\begin{aligned} G_{com}(g_{com1}, \dots, g_{comn1}) \\ P_{net}(p_{net1}, \dots, p_{netn1}) \\ C_{ons}(c_{ons1}, \dots, c_{onsn1}) \end{aligned} \quad (4.2)$$

Katrs īpašnieks tiecas palielināt savu peļņu (vai samazināt izdevumus).

$$R(Own_j) \Rightarrow \max \quad (4.3)$$

Vispārīgā gadījumā varam iztēloties, ka īpašnieka peļņa ir jebkāda nelineāra funkcija no: Īpašumā esošo objektu konfigurācijas  $\Sigma$  un parametriem  $\Pi$ .



2. Pastāvošās metodikas, pieejas un programmatūras rīki ļauj samazināt pētāmo MHES iespējamo konfigurāciju skaitu.
3. Saskaņā ar 3.8. apakšnodaļā aprakstīto MHES darbības režīmu var izvēlēties, ņemot vērā kaimiņu uzņēmumu vajadzības. Šajā situācijā varam uzskatīt, ka visu uzņēmumu intereses var pakļaut konsorcija peļņas maksimizācijai.

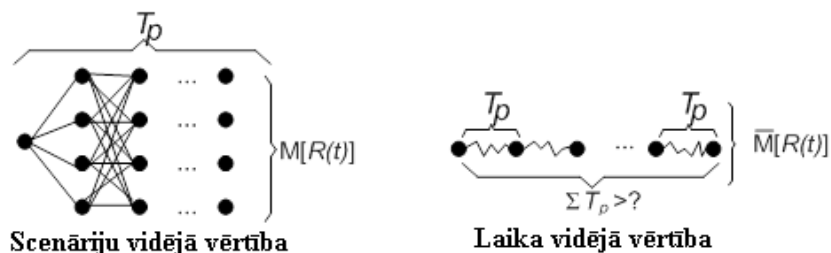
Analizējot izteiksmes (3.2) un (4.7), varam secināt, ka stohastiskā pieeja likusi mums formulēt ārkārtīgi sarežģītu mērķa funkciju, kas attiecas uz nepieciešamo aprēķinu darbu un milzīgo ievaddatu apjomu. Lai aplēstu paredzamo peļņu saskaņā ar (4.7), mums jāaprēķina daudzdimensiju integrālis. Jāpiebilst, ka integrāļa dimensiju skaits aplūkojamajai problēmai var būt ārkārtīgi liels, jo parastais plānošanas horizonts mērāms tūkstošos stundu, līdz ar to integrāļa dimensiju skaits ir atbilstošs. Turklāt konkrētajā problēmā nākas operēt ar vairākiem savstarpēji saistītiem stohastiskiem procesiem. Šajā gadījumā būtu jāņem vērā autokorelācijas un korelācijas funkcijas, kas veido ārkārtīgi sarežģītu un aprēķinietilpīgu sadalījuma funkciju, kas tādējādi nav piemērota praktiskai lietošanai.

Integrāļa (3.2) aprēķināšanas grūtības var uzskatīt par galveno iemeslu scenāriju pieejas izmantošanai. Taču stohastisko procesu teorija pēta konkrēta tipa, tā saucamos ergodiskos, procesus, kuru uzvedība vidēji laikā ir tāda pati kā vidēji stāvokļu telpā [41]. Citiem vārdiem, ergodiskums nozīmē, ka vērtība, kas aprēķināta kā vidējais laikā, ir vienāda ar vērtību, kas aprēķināta kā vidējais stāvokļu telpā. Šī īpašība ļauj izvairīties no daudzdimensiju integrāļa aprēķināšanas.

Tagad pieņemsim, ka aplūkojamais process (laikā mainīgā peļņa) ir ergodisks. Šādā gadījumā, kā redzams 4.1. attēlā, mēs varam aizstāt paredzamo scenāriju vidējo vērtību ar laika vidējo vērtību:

$$M[R_{ri}] \approx \bar{R}_{ri} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T R_{ri} dt \quad (4.8)$$

Pāreja uz laika vidējo vērtību ļauj mums aprēķināt paredzamo vidējo problēmu bez eksplīcītām zināšanām par nosacīto varbūtības [42] sadalījuma funkciju (3.1). Tomēr rezultātā iegūtais vienkāršojums rada jaunas grūtības, jo laika vidējā vērtība pietuvojas scenāriju vidējai vērtībai tikai tad, kad integrēšanas laiks un procesu ilgums tiecas uz bezgalību [36].



4.1. att. Stohastiskā optimizācijas uzdevuma pārveidojums [10].

Tā rezultātā nepieciešams izmantot stohastisko procesu prognozēšanas procedūru. Praksē laiku nosaka prasības attiecībā uz precizitāti, skaitļošanas izmaksām un uzdevuma sarežģītību, ko izsaka zemintegrāļa izteiksme.

#### 4.2. Optimizācijas uzdevuma sadalīšana un ierobežošana

Pieņemsim, ka MHES īpašnieks ir nākamās dienas elektroenerģijas tirgus spēlētājs. Aplūkots tiek ilgtermiņa plānošanas problēma. Šajā situācijā varam apgalvot, ka:

- 1) peļņa tiek uzkrāta  $N$  gadus jeb  $N_t \cdot 8760$  stundas;
- 2) peļņu ietekmē elektroenerģijas tirgus cenas, ūdenskrātuvē ietilpstošā ūdens caurplūdums un iespējami citi stohastiski procesi;

- 3) visus procesus iespējams prognozēt ar vienas stundas izšķirtspēju.
- 4) prognozēšanas rezultāti mainās katru dienu un katru stundu;
- 5) peļņas vērtības aprēķināšanai nepieciešams atsevišķi izvēlēties MHES jaudu nākamās dienas tirgum un pašreizējās dienas tirgum.

Formulēsim gada peļņas  $M[R(Own_i)]$  maksimizācijas uzdevumu. Plānošanas perioda peļņu iespējams aprēķināt kā visu gadu peļņas summu. Katru gada peļņu  $R_i$  iespējams attēlot kā atsevišķo dienu peļņas vērtību summu:

$$R_i = \sum_{K=1}^{365} \sum_{J=1}^{24} M[R(Own_i)]_j \quad (4.9)$$

Analizējot (4.9), varam secināt, ka vienas dienas peļņa ir sasaistīta ar citas dienas ūdens daudzumu ūdenskrātuvēs dienas sākumā un tās beigās. Ja šis lielums ir konstants (šāda iespēja tiks pierādīta turpmāk), peļņas aplēšana kļūst daudz vienkāršāka, īpaši, ja tiek ņemta vērā Montekarlo metodes izmantošanas racionalitāte, veicot aplēses ilgu laika periodu peļņai. Šajā gadījumā, izmantojot minētās metodes īpatnības un nejauši izvēlēto dienu ierobežoto skaitu, varam aplēst ilgtermiņa peļņu. Šī pieeja kļūst noderīga, kad ir zināms ūdens daudzums ūdenskrātuvē. Diemžēl šos mainīgos nav iespējams izvēlēties, balstoties uz problēmas formulējumu vienai dienai. Ūdens daudzums dienas sākumā ir atkarīgs no iepriekšējā procesa, savukārt daudzums dienas beigās ietekmē nākamās dienas peļņu.

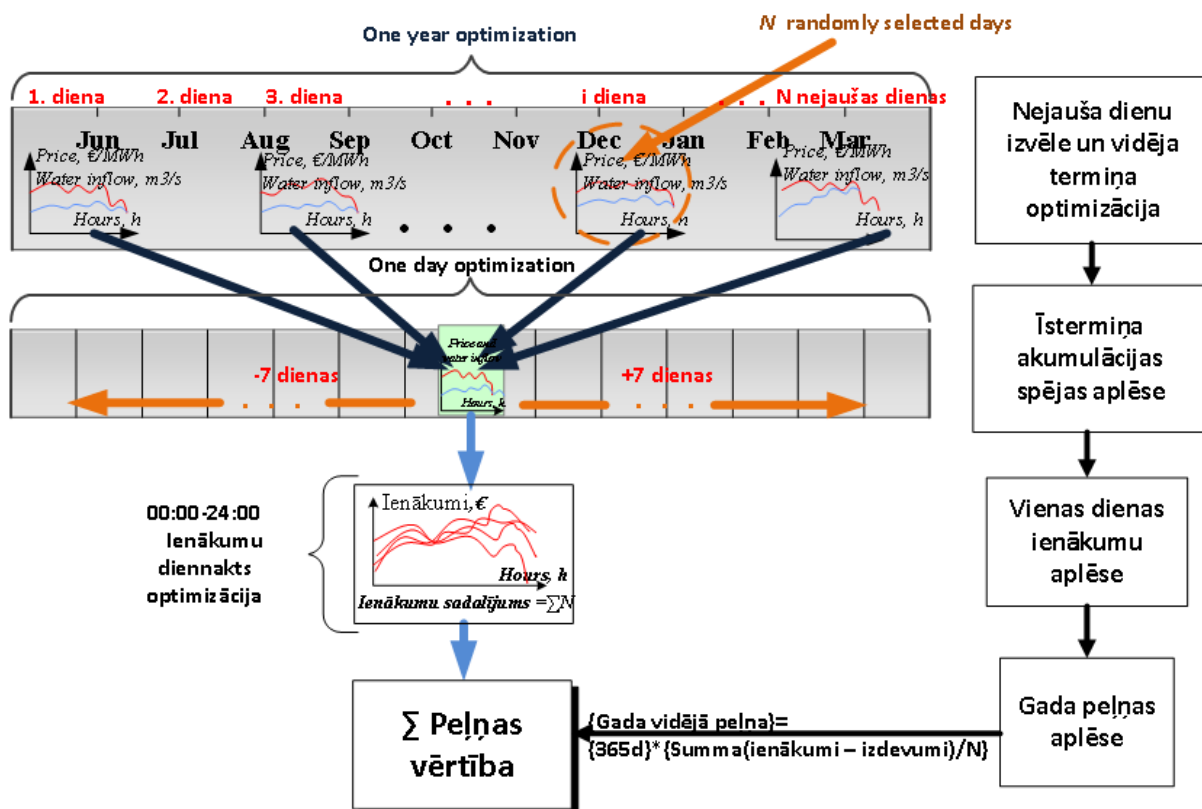
Tas noved mūs atpakaļ pie ilgtermiņa problēmas un tādējādi pie nepieciešamības atrisināt uzdevumu ar lielu lēmumu mainīgo skaitu. Tomēr vienas dienas optimizācijas problēmas uzrādīšana ļauj mums atrisināt ūdens daudzuma fiksēšanas jautājumu, izmantojot relatīvi vienkāršu un efektīvu rīku. Šis rīks balstās uz specifiskajām MHES īpašībām:

- MHES ūdenskrātuves pašsaprotami ir samērā nelielas;
- linearizēti MHES modeļi nerada izšķirošas kļūdas peļņas aplēsēs.

Turklāt optimizācijas procedūru novērojumi ļauj mums secināt, ka, ņemot vērā ierobežoto dienu skaitu, ir iespējams atrisināt vienai dienai formulētu uzdevumu un ka risinājuma rezultāti ir vāji atkarīgi no ūdens daudzuma ūdenskrātuvē aplūkojamā perioda beigās.

Rezultātā vienkāršotu optimizācijas algoritmu var attēlot ar 4.2. att. parādīto struktūru. Tajā tiek izpildīti šādi soļi:

- 1) tiek nejauši izvēlēta konkrēta diena. Līmenis ūdenskrātuvē nav zināms. Lai novērtētu ūdenskrātuves līmeni, izvēlamies 7 dienas pirms un 7 dienas pēc izvēlētas dienas un atrisinām optimizācijas uzdevumu, izmantojot MHES lineāru modeli. Nākamajā solī tiek izmantoti tikai ūdenskrātuves līmeņi (šīs izvēles motivācija atrodama [36]);
- 2) izvēlēto dienu peļņas maksimizācija, izmantojot nelineāru modeli;
- 3) tiek sagatavoti minētie soļi. Izmēģinājumu skaitam jābūt pietiekami lielam, lai panāktu nepieciešamo precizitāti.



4.2. Galvenais optimizācijas algoritms, kombinējot ilgo, vidējo un īso termiņu [36].

### 4.3. Izmēģinājumu skaita samazināšana, izmantojot Montekarlo metodi peļņas aplēšanai

Aplūkosim vienas dienas peļņu  $R_{ik}$ , kuru iespējams iegūt gada  $k$  dienā  $i$ :

Sakarā ar gadījuma un nenoteiktu parametru ietekmi arī  $R_{ik}$  ir gadījuma raksturs. Pieņemsim, ka  $R_{ik}$  iespējams izteikt šādi:

$$R_{ik} = M[R_k] + \underline{R}_{ik} \quad (4.10)$$

kur  $M[R_k]$  — vidējās peļņas gadā  $k$  matemātiskā cerība;

$\underline{R}_{ik}$  — centralizēts gadījuma mainīgais. Papildus pieņemsim, ka  $M[\underline{R}_{ik}]$  iespējams izteikt kā 2 komponentu summu:

$$M[\underline{R}_{ik}] = d(k)M_1[R_k] + M_2[\underline{R}_{ik}] \quad (4.11)$$

kur  $d(k)$  — koeficients, kas ļauj ņemt vērā ikgadējas peļņas izmaiņas, ko ietekmē cenu pieaugums šo gadu laikā. Izteiksmi (4.10) iespējams pārrakstīt šādi:

$$M[\underline{R}_{ik}] = M_1[\underline{R}_{ik}](1 + d(k)) \quad (4.12)$$

Aprēķini, izmantojot (4.12), ļauj mums aplēst jebkuras dienas peļņas matemātisko cerību, izmantojot pirmā gada procesa statistisko modeli. Uzskatām, ka  $R_{i1} = R_{i2} = \dots = R_{iR}$ . Tas nozīmē, ka  $R_{ik}$  varbūtības sadalījuma funkcija šo gadu laikā paliek konstanta. Uzskatām, ka vienas dienas ietvaros novērojamais process ir stacionārs; tas nozīmē, ka varam aprēķināt vidējo peļņu kā laika vidējo vērtību. Izteiksme ļauj mums aprēķināt jebkura gada ienākumus, izmantojot tikai pirmā gada procesu varbūtisku atainojumu. Šī iespēja ārkārtīgi samazina veicamo izmēģinājumu skaitu, īstenojot Montekarlo metodi peļņas aplēšanai.

#### 4.4. Koalīcijā darbošie MHES modeļi un peļņas veidošanās

Partnera uzvedības modelis ir šāds.

Iespējamie partneri ir šādi: pārējo kaskādē ietilpstošo elektrostaciju īpašnieki, vietējie elektroenerģijas patērētāji, zvejnieki, ūdens patērētāji u.c. Šeit mums ir 2 darbības uzvedības veidi:

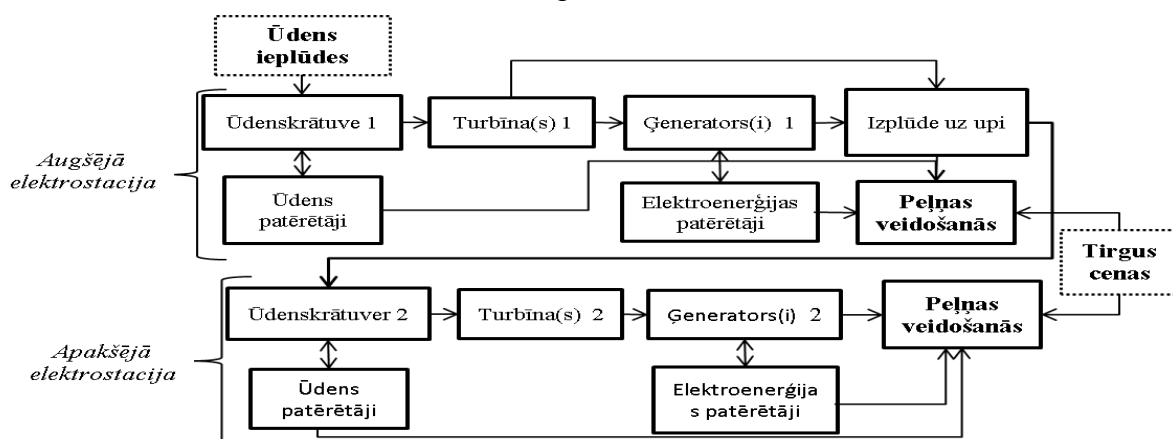
- 1) neatkarīgi citam no cita; katrs partneris tiecas pēc savas paša peļņas vai ieguvuma maksimizācijas;
- 2) sadarboties.

Nekādā veidā nezaudējot vispārīgumu, tālāk aplūkosim koalīciju no divām MHES, kas darbojas kaskādē, un diviem vietējiem patērētājiem (šis skaita ierobežojums nav būtiski svarīgs, skaitu iespējams paplašināt). Mūsu izejas nosacījumi ir šādi:

- 1) nepastāv partneri vai klienti, kuri izmantotu ūdeni (vismaz enerģijas ražošanai);
- 2) MHES īpašnieki ir dažādi;
- 3) pastāv vietējie enerģijas patērētāji.

Aplūkojamās sistēmas struktūra parādīta 4.3. att. Kad pirmā un otrā MHES darbojas neatkarīgi viena no otras, pirmā MHES var atrisināt optimizācijas uzdevumu egoistiskā veidā, neņemot vērā otrās MHES, kā arī vietējā patērētāja intereses.

Tajā pašā laikā otrās elektrostacijas īpašniekam jāpieņem lēmums atbilstoši pirmās MHES darba stāvoklim, tajā pašā laikā tiecoties pēc maksimālas peļņas, jo ūdens ieplūdi ūdenskrātuvē nosaka ne tikai dabas faktori, bet tiešā veidā arī pirmās MHES darbības režīms.

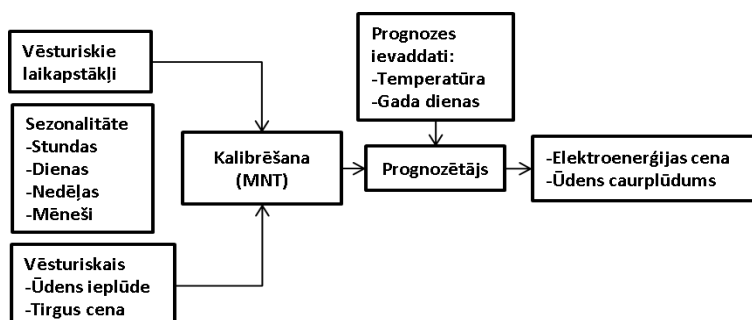


4.3. att. Kaskādē izvietotu MHES peļņas aprēķināšanas struktūrshēma.

4.3. attēlā redzamajā modelī aprakstīta sistēmas dalībnieku peļņa kā funkcija no ūdens ieplūdes, visu bloku parametriem, MHES parametriem, patērētāju darbības režīma.

#### 4.5. Prognozēšanas procesi

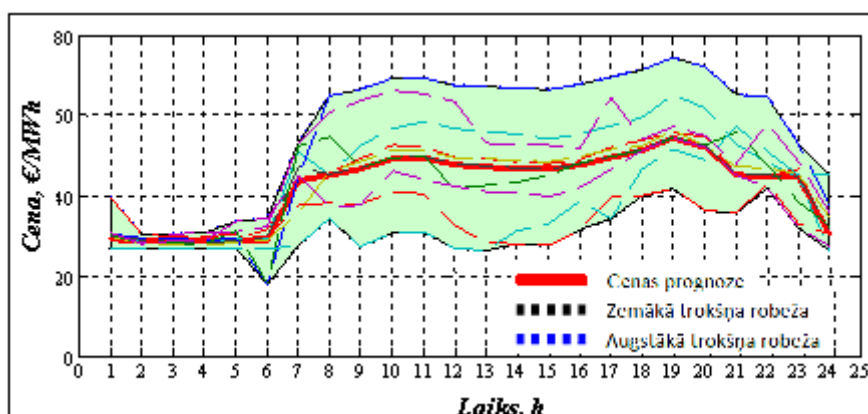
4.4. attēlā parādīta blokshēma ar procesiem, kas nepieciešami, lai izveidotu prognozēšanas modeli, kas prognozē nākotnes elektroenerģijas tirgus cenu un ūdens caurplūdumu, izmantojot mākslīgos neironu tīklus (MNT).



4.4. att. Modeļa projektēšanas procedūru blokshēma.

Pieņemsim, ka visas prognozes var veikt, prognozējot vidējo vērtību. Arhivēti un ir pieejami vēsturiskie prognožu dati, kā arī prognozēšanas kļūdas. Prognozēšanas kļūdu statistiskās īpašības ir laikā konstantas, kas ļauj mums ģenerēt stohastisku procesu realizācijas. Šo procesu ilgumu ierobežo tikai pieejamie vēsturiskie dati un to novecošanās ātrums.

Balstoties uz iepriekšminētajiem pieņēmumiem, aplēšam prognozēšanas kļūdas. Tā rezultātā, veicot vidējo vērtību prognozēšanu uz nākamo dienu, prognoze tiek koriģēta, pievienojot vēsturiskās prognožu kļūdas, tādējādi ļaujot modelēt ilgas nākotnes procesu realizācijas, kas nepieciešamas, lai aprēķinātu laika vidējo peļņas vērtību. Risinot 24 stundu plānošanas apakšproblēmu, noderīgi ir izmantot stohastisko optimizāciju [36].

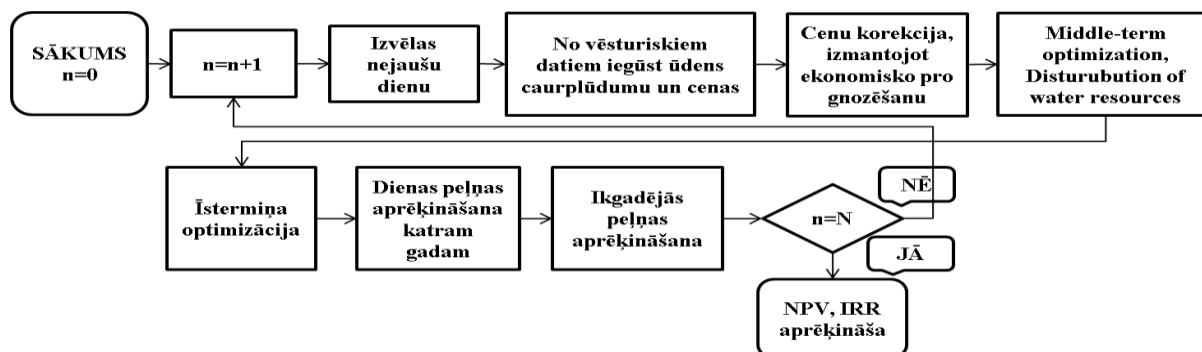


4.5. att. Elektroenerģijas tirgus cenu prognozes [36].

Jāievēro, ka šim izmēģinājumam mēs izmantojām kopā 11 realizācijas. Prognozes 2014. gada 21. janvārim (4.5. att.) tika veiktas īstermiņa optimizācijas algoritmā, un, kad visas 11 no tām tika ņemtas vērā, attiecīgajai dienai paredzamā peļņa palielinājās no 1727,2 līdz 1905,8 eiro. Tas ir paredzamās peļņas palielinājums par 10,34 %, kad ņemta vērā cenu prognožu nenoteiktība. Var secināt, ka, veicot akumulācijas stacijas īstermiņa darbības optimizāciju, ir lietderīgi izmantot stohastisko pieeju. Tas atspoguļosies arī ilgtermiņa plānošanā, novērtējot potenciālo peļņu [36].

#### 4.6. Ilgtermiņa plānošanas problēmu īpatnības

Maksimizācijas problēma (4.11) būtu jārisina, ņemot vērā virkni tehnisku, ekoloģisku, juridisku un finansiālu ierobežojumu. Funkcija (4.11) vispārīgā gadījumā ir nelineāra un ir atkarīga no gadījuma vai nenoteiktiem mainīgajiem, piemēram, elektroenerģijas tirgus cenas, diskonta likmes u.c. Uzdevumu (4.11) iespējams atrisināt, aprēķinot pašreizējo neto vērtību un iekšējās atdeves likmi [43], balstoties uz Montekarlo algoritmu, kā redzams 4.6. att.



4.6. att. Algoritms HES neto pašreizējās vērtības novērtēšanai, balstoties uz Montekarlo metodi.

HES tehniski ekonomiskajiem pamatojumiem būs nepieciešams gada ienākumu aprēķins. Tādēļ izanalizēsim, kāds dienu skaits būtu nepieciešams, lai kļūda būtu tik maza, cik vien iespējams. Pirmām kārtām, mums jāzina (jāprognozē) ūdens caurplūdums un elektroenerģijas tirgus cenas; tad



varam veikt īstermiņa un vidēja termiņa elektrostacijas darbības optimizāciju, kuras noslēgumā mums būs zināma īstermiņa un vidējā termiņa peļņa, kas ļaus aprēķināt ikgadējo peļņu. Montekarlo modelēšanā tiek nejauši izvēlēts dienu skaits kā ievaddati dažādajiem uzdevumiem iespējamo iznākumu ģenerēšanai.

## 5. PIEMĒRI UN ATSEVIŠĶA GADĪJUMA IZPĒTE

Aprakstīsim un izanalizēsim galvenās izpētei izvēlētās reālās MHES īpašības. Elektrostacija un ūdenskrātuve izbūvētas uz Goinukas upes Bingolas pilsētā Turcijas austrumos. Augšbjefa augstums ir 130 m; nominālā jauda ir 21 MW; gada vidējā ieplūde ūdenskrātuvē ir 5,48 m<sup>3</sup>/s, maksimālais ūdens līmenis pirms aizsprosta ir 3 m; hidroenerģētiskā agregāta lietderības koeficients ir 90 %, un ūdenskrātuves virsmas laukums ir 40 000 m<sup>2</sup>. Kopējās elektrostacijas būvniecības izmaksas ir 15 000 000 €.

### Safas HES ierobežojumi:

a) ūdenskrātuves uzkrāšanas tilpuma robeža:

$$1 \text{ m} \leq h_i^t \leq 3 \text{ m} \quad (5.1)$$

kur  $h$  — ūdens līmenis,  $min$  un  $max$  ir zemākais un augstākais pieļaujama  $t$  un  $i$  (kas rāda attiecīgi laiku un ūdenskrātuvi) līmenis;

b) ūdenskrātuves ūdens izplūde:

$$Q_{i,min}^t \leq Q_i^t \leq 17,03 \text{ m}^3/\text{s} \quad (5.2)$$

kur  $Q_{min}$  un  $Q_{max}$  ir attiecīgi ūdens izplūdes apakšējā un augšējā robeža;

c) elektrostacijas ģenerācijas raksturlīkne:

$$0 \leq P_i^t \leq 21 \text{ MWh} \quad (5.3)$$

kur izejas jauda  $P$  ir ģenerētā jauda;

d) ūdens bilances vienādojums:

ūdens caurplūdums caur turbīnu ( $Q$ ) ir negatīvs mainīgais.

$$V_i^{t+1} = V_i^t + (I_i^t - Q_i^t) \cdot \Delta t \quad (5.4)$$

kur  $V$  apzīmē uzkrāto tilpumu un  $I$  ir ieplūde metros;

e) ūdenskrātuves sākotnējais un beigu uzkrātais tilpums:

$$H_{i,1} = H_{i,begin} \quad (5.5)$$

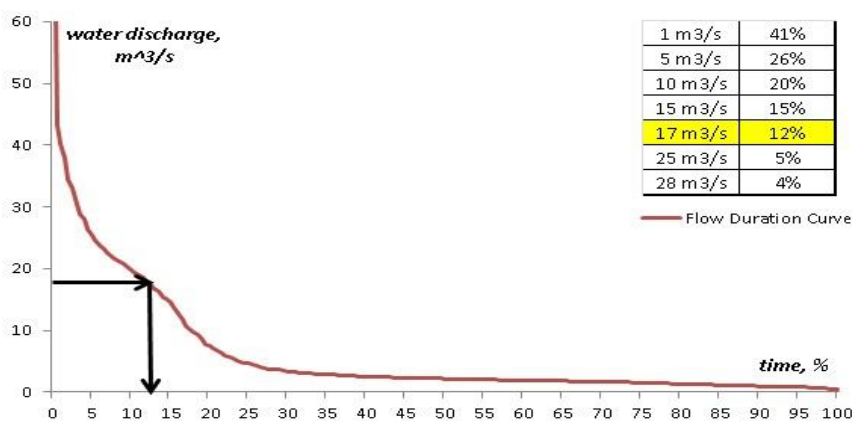
$$H_{i,25} = H_{i,end} \geq 1 \text{ m} \quad (5.6)$$

kur  $i$  ir ūdenskrātuves indekss,  $H_{i,1}$  ir ūdenskrātuves sākotnējais (1. stundas) uzkrātais līmenis;  $H_{i,end}$  ir ūdenskrātuves beigu (25. stundas) uzkrātais līmenis; tas nevar būt mazāks par 1 m ekoloģisku faktoru un zivju vārtu dēļ;

f) ūdens izmantošanas tiesības Turcijā; lejup pa straumi izplūstošā ūdens daudzumam jābūt vienādam vismaz ar 10 % no pēdējās desmitgades vidējā caurplūduma. Ja pašreizējais caurplūdums mazāks par 10 % no upes vidējā caurplūduma 10 gados, lejup pa straumi jāļauj izplūst visam ūdenim, lai uzturētu dabas organismu dzīvības procesus [44].

$$I_i^t \cdot 10 \% \leq Q_i^t \quad (5.7)$$

Caurplūduma nodrošinājuma līkne rāda caurplūduma sadalījumu gada laikā, kas ir noderīgi, lai aprēķinātu konkrētam hidroenerģētiskajam projektam pieejamo ūdens daudzumu. 5.1. attēlā parādīta vairāku gadu dienas vidējo izplūžu līkne Goinukas upes aprēķina šķērsgrīzumā.



5.1. att. Caurplūduma sadalījuma līkne 1990.–2000. gadam.

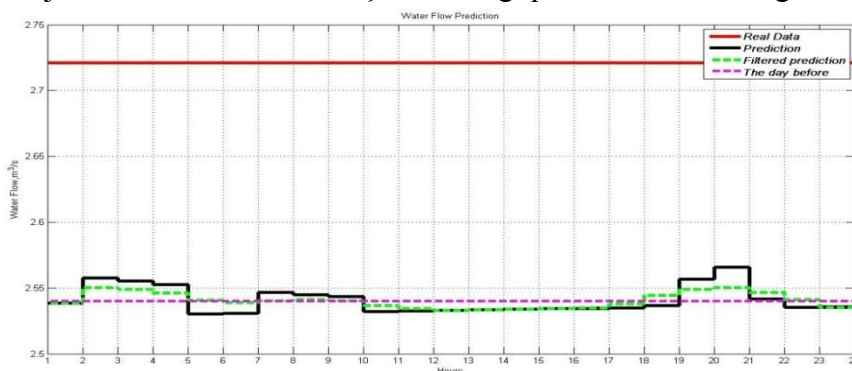
Saskaņā ar šiem datiem vairākgadu vidējā gada caurplūduma pārsniegums vienāds ar 17,03 m<sup>3</sup>/s aprēķina šķērsgrīzumā 12 procentos gada; tas nozīmē, ka šī izplūde ļauj ģenerēt pilnu jaudas apjomu 44 dienas gada laikā.

### 5.1. Prognozēšanas process

Prognozes iegūšanas rīki un process tika aprakstīti 4.5. apakšnodaļā. Mākslīgā neironu tīkla apmācība notiek uzraudzīti, izmantojot vēsturiskos datus (2013. gada statistika) par tirgus cenām un ūdens ieplūdes caurplūdumiem Goinukas upē. Uzsveram, ka, tā kā Turcijā elektroenerģijas tirgus cenas ir pieejamas tikai tirgus dalībniekiem, autors ņēmis ikstundas elektroenerģijas tirgus cenu no *Nord Pool Spot* datiem [45].

#### 5.1.1. Ūdens caurplūduma un elektroenerģijas tirgus cenu prognozēšana

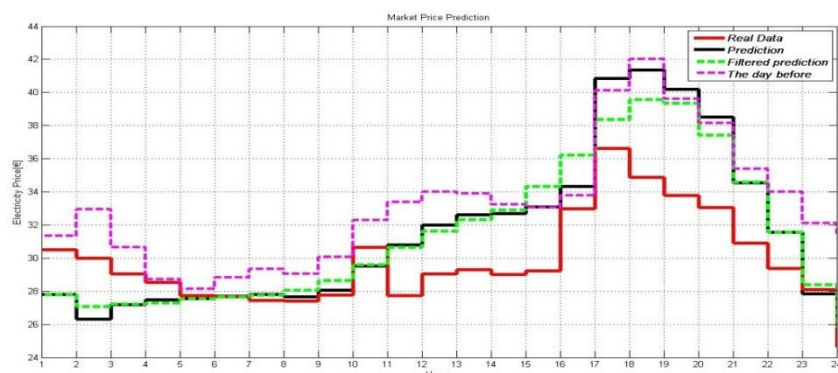
5.2. attēlā redzama ūdens caurplūduma prognoze. Maksimālā kļūda ir aptuveni 6 %. Tehniski ekonomiskā pamatojuma veikšanā šie dati ir ļoti noderīgi precīzas atbildes iegūšanai.



5.2. att. Ūdens caurplūduma prognoze 24 stundām.

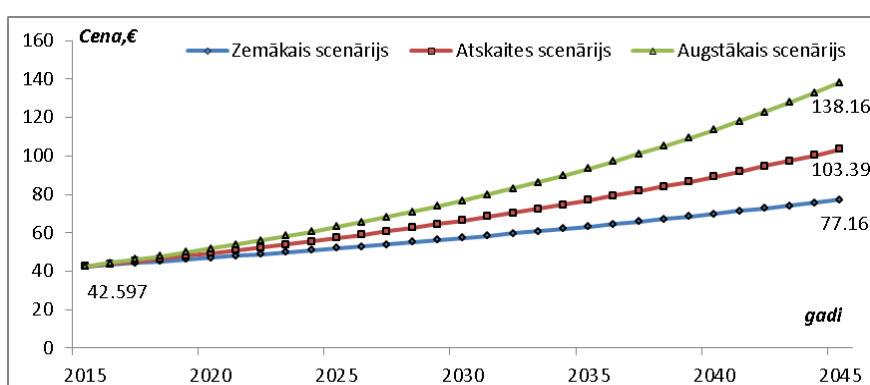
Veikta laikrindas prognozes analīze, izmantojot neironu tīklu ar programmatūras *Matlab* palīdzību. Katram prognozēšanas pētījumam iegūtie prognozes rezultāti validēti, salīdzinot ar faktiski izmērītajiem datiem. Varam secināt, ka pierādījies, ka mākslīgo neironu tīklu prognozēšanas paņēmiens sniedz precīzus rezultātus aplūkojamā objekta gadījumā.

Atšķirība starp prognozētajām un faktiskajām elektroenerģijas tirgus cenām un prognozēšanas kļūda attēlotas 5.3. attēlā. Prognozēšanas kļūda bija aptuveni 15 %, tomēr var secināt, ka ir lietderīgi izmantot stohastisko pieeju, ņemot vērā elektroenerģijas tirgus cenu prognozes nenoteiktību, lai veiktu MHES īstermiņa darbības optimizāciju. Tas atspoguļosies arī ilgtermiņa plānošanā, novērtējot potenciālo peļņu.



5.3. att. Tirgus cenas prognoze 24 stundām.

Ilgtermiņa prognozēm varam izmantot ikgadējās elektroenerģijas cenas. Elektroenerģijas cenām ilgtermiņa griezumā ir augsta mainība, kas sarežģī to nākotnes vērtības prognozēšanu, tomēr kā atskaites gadījums saskaņā ar rakstu [46,47] rezultātiem veikta prognoze (sk. 5.4. attēlā) [47].



5.4. att. Elektroenerģijas cenu prognozes, 2015.–2045. g.

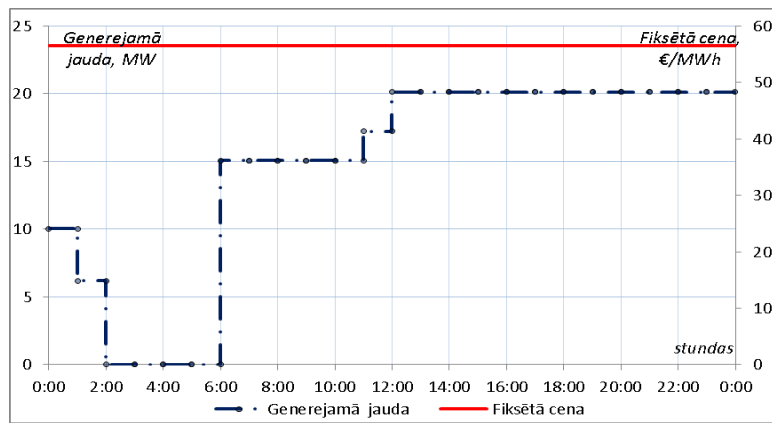
Tiek īstenoti 3 cenu scenāriji, kas balstās uz dažādiem pieņēmumiem — zemās, atskaites un augstās prognozes scenāriji. Attiecīgi šajos scenārijos tiek pieņemts, ka, sākot no 2015. gada, elektroenerģijas cenas gadā pieaugs par 2 %, 3 % vai 4 %.

## 5.2. Optimizācijas metožu izmantošanas rezultāti un salīdzinājums Safas MHES

Pielietojot 2 modeļus, salīdzināsim MHES optimizācijas rezultātus. Pirmais modelis ir deterministisks, proti, tajā nav ņemtas vērā nenoteiktības, kas saistītas ar ūdens ieplūdes un elektroenerģijas cenas prognozēm. Otrais modelis ir stohastisks. Salīdzināsim MHES tehniski ekonomisko pamatojumu izstrādes un režīmu darbības uzdevumu metodes. Abiem uzdevumiem — gan deterministiskajam, gan stohastiskajam — ir kopīgas īpašības: galveno mērķa funkciju abos uzdevumos iespējams formulēt kā peļņas maksimizāciju, lēmumi jāpieņem procesu prognozēšanas ceļā un optimizācijas procedūrām abos gadījumos jābūt nelineārām un tādām, kas spēj ņemt vērā lielu skaitu lēmumu mainīgo un stohastisko mainīgo.

### a. Deterministiskā metode (fiksētā cena).

Safas HES darbības režīms ar fiksētu elektroenerģijas cenu attēlots 5.5. attēlā, kur ņemta vērā konstanta elektroenerģijas cena un ūdens caurplūdums. Darbojoties ar fiksētu cenu, elektroenerģijas ražotājs var maksimizēt ienākumus, palielinot saražotās enerģijas daudzumu, jo elektroenerģijas cena ir konstanta un netiek izmantota optimizācijas procesā.



5.5. att. HES saražotā elektroenerģija atbilstoši fiksētam cenu grafikam.

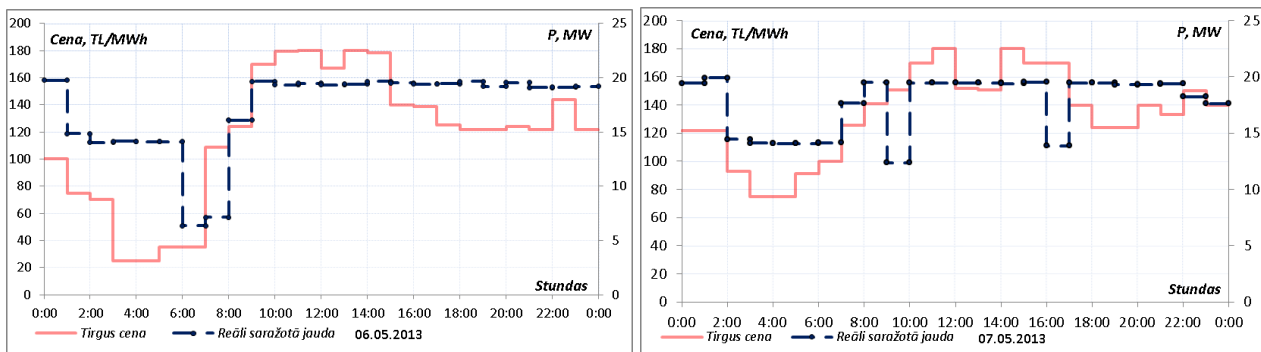
Komentāri par iegūto rezultātu tiks sniegti kopā ar stohastiskās optimizācijas rezultātu analīzi.

### b. Stohastiskā metode.

Tiek izmantota stohastiskā metodika un 3. un 4. nodaļā aprakstītās formulas. Cenšamies atbildēt uz šādu jautājumu: kā izstrādāts modelis izmanto papildu informāciju par nenoteiktām elektroenerģijas cenām un ūdens ieplūdi ūdenskrātuvēs, un kā mainās peļņa, kad tiek izmantotas tirgus cenas?

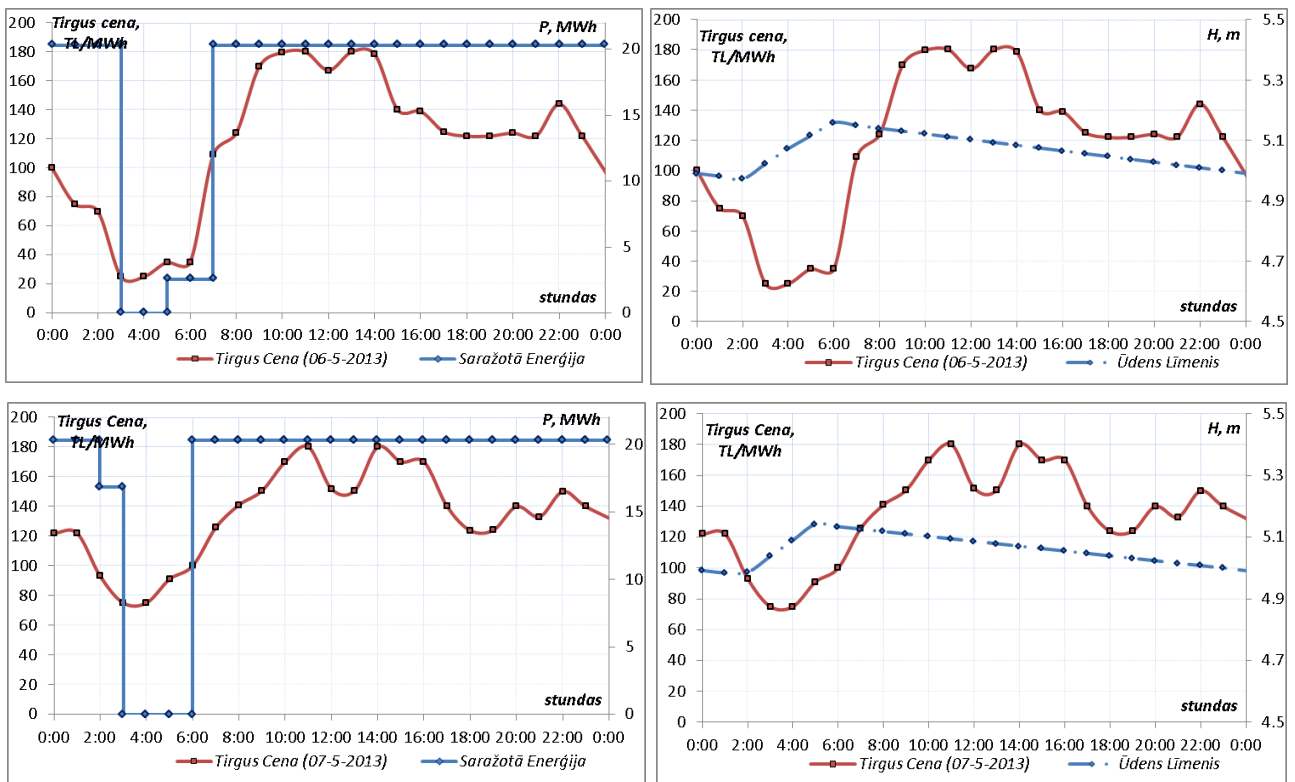
Stohastiskais modelis ņem vērā ūdens caurplūduma un cenu svārstības, lai nākamajā dienā iegūtu maksimālo peļņu. Viens no šī darba mērķiem ir pārbaudīt kvaziņūtona metodi, kā tā darbojas MHES stohastiskā optimizācijā. 5.6. attēlā atainota reālā Čobanlı HES saražotā enerģija divās pēc kārtas esošās dienās.

Tomēr diemžēl šajā gadījumā redzam, ka enerģijas ražošanas rezultāti nav optimāli. Lai maksimizētu ienākumus, būtu jāveido ūdenskrātuves ūdens izlaides grafiks, lai iegūtu optimālu darbību caur turbīnu/turbīnām. Netika uzturēti ūdens uzkrāšanas līmeņi, lai maksimizētu ienākumus no enerģijas ražošanas.



5.6. att. Reāli saražotā jauda atbilstoši tirgus cenu grafikam (06.05.2013.–07.05.2013)[48].

Kad enerģijas ražošana tiek optimizēta atbilstoši tirgus cenu grafikam, tiek iegūti rezultāti, kas redzami 5.7. attēlā. Tas ļauj secināt, ka mazās hidroelektrostacijas savāc ūdeni ūdenskrātuvē tajā gadījumā, kad cenas tirgū ir zemākas, un izmanto ūdeni, kad tirgus cena ir augsta. Veiktās optimizācijas rezultāti uzrāda līdzību ar enerģijas ražošanu 24 stundu griezumā, ar precīzāku režīmu plānošanu, lai iegūtu maksimālus ienākumus. Optimizācijas modelis izmantots, ņemot vērā pašreizējo uzkrāšanas spēju, un to var pielietot arī nākotnes uzkrāšanas spējas vērtībām, kas tiks aprakstīts nākamajā apakšnodaļā attiecībā uz Safas HES tehniski ekonomisko pamatojumu.



5.7. att. Čobanlı HES optimizētā enerģijas ražošanas atbilstoši tirgus cenu grafikam un ūdenskrātuves ūdens līmenis (06.05.2013.–07.05.2013).

**Rezultāti.** Spriežot pēc rezultātiem 5.7. attēlā, ļauj secināt, ka šī HES savāc ūdeni pirms aizsprosta gadījumā, kad cenas tirgū ir zemākas, un ūdeni izmanto, kad tirgus cena kļūst augstāka.

Par minētajām divām dienām (06.05.2013.–07.05.2013.) varam secināt, ka, ja Čobanlı HES varētu darboties ar fiksētu cenu, ienākumi būtu 1047 345 Turcijas liras (TL). Elektrostacija darbojas ar tirgus cenām, un reālie ienākumi bija 108 953 TL. Tomēr atbilstoši mūsu optimizācijas modelim ar tirgus cenu ienākumi sasniedz 115 038 TL. Iegūtie rezultāti ļauj mums secināt, ka stohastiskajā gadījumā enerģijas ražotājam pastāv iespēja maksimizēt ienākumu apmēru ierobežotu resursu apstākļos. Šādi rezultāti pierāda ne tikai izmantoto modeļu validitāti, bet arī ekspluatētāja prasmes.

Papildus varam secināt, ka izmantotā optimizācijas procedūra, proti, kvaziņūtona metode, visos gadījumos spēja sasniegt mērķa funkcijas globālo maksimumu.

### 5.3. Papildu ienākumu sadalījums, izmantojot Šepļija vērtību

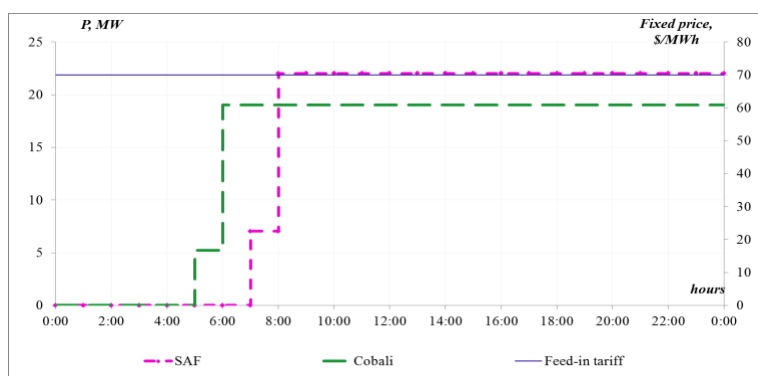
Izstrādātā optimizācijas algoritma darbotiespēju ilustrē Safas HES (pirmais spēlētājs) un Čobanlı HES (otrais spēlētājs) režīmu optimizācijas piemērs. Tehniskie dati abām HES apkopoti 5.1. tabulā.

5.1. Tabula

Hidroelektrostaciju tehniskie dati

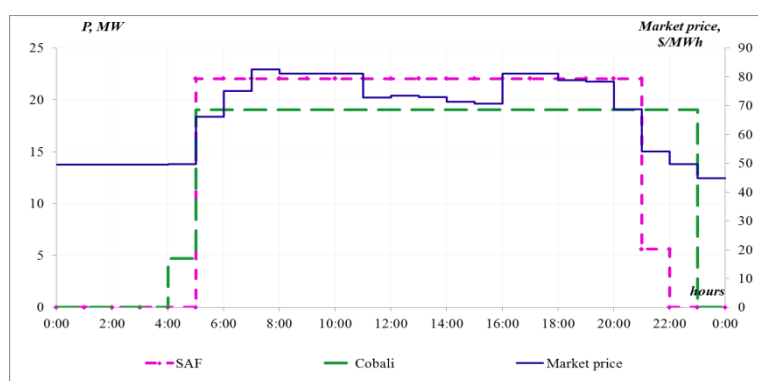
Elektrostacija	Jauda	Agregātu skaits	Caurplūdums caur turbīnu	Spiedienaugstums
Safas HES	21 MW	3	17,03 m <sup>3</sup> /s	130 m
Čobanlı HES	19 MW	3	18,0 m <sup>3</sup> /s	125,81 m

Pieņemsim, ka abas elektrostacijas darbojas atbilstoši fiksētam cenu grafikam. Saražotā enerģija obligātā iepirkuma ietvaros atainota 5.8. attēlā izvēlētai dienai. Safas HES ienākumi ir 25 066,9 €, Čobanlı HES – 24 344,96 € [49].



5.8. att. Hidroelektrostaciju saražotā elektroenerģija atbilstoši fiksētajam cenu grafikam [49].

Elektroenerģijas ražotāji var gūt papildu ienākumus, izveidojot koalīciju ar elektroenerģijas tirgotāju. Uzskatām, ka publiskais tirgotājs pārstāv sabiedrību, un viņam HES darbība jāorganizē atbilstoši tirgus nosacījumiem. Safas un Čobanli HES saražotās elektroenerģijas grafiki attēloti 5.9. attēlā.



5.9. att. Hidroelektrostaciju saražotā elektroenerģija atbilstoši tirgus cenu grafikam [49].

Ienākumi, kas tiek gūti no Safas HES piedalīšanās elektroenerģijas tirgū, vienādi ar 27 093,18 €. Ja HES pārdod visu saražoto elektroenerģiju (kura tiek ražota atbilstoši tirgus cenu grafikam) obligātā iepirkuma ietvaros par ievadtarifu, tā saņem 25 066,9 €. Tādējādi šajā gadījumā varam secināt, ka Safas HES ir vērts darboties, vadoties pēc fiksētā cenu grafika. Ja stacija cenšas maksimizēt saražoto aktīvo jaudu, ienākumi ir 25 166,7 €. Papildu ienākumus aprēķina atbilstoši tirgus cenai, un to vērtība ir 1378,22 €. Papildu ienākumi, ja HES darbojas atbilstoši tirgus cenu grafikam, vienādi ar  $1378,22/2 = 689,11$  € [49].

Čobanli HES gūtie ienākumi ir 25 349,26 €, ja tā darbojas elektroenerģijas tirgus apstākļos; savukārt, darbojoties obligātā iepirkuma ietvaros, tā saņem 24 344,96 €. Papildu ienākumi, ja HES darbojas atbilstoši tirgus cenu grafikam, ir  $293,74/2 = 146,87$  € [49]. Rezultāti ir apkopoti 5.2. tabulā.

5.2. Tabula

Hidroelektrostaciju ienākumu matrica

Elektroenerģijas ražotājs	Ievadtarifs	Tirgus tarifs	Papildu ienākumi
<i>Saf HPP</i>	25 066,9 €	27 093,18 €	689,11 €
<i>Cobanli HPP</i>	24 344,96 €	25 349,26 €	146,87 €

Šie rezultāti ļauj secināt, ka dalībnieki var gūt papildu ienākumus no piedalīšanās spēlē, un tos iespējams taisnīgi sadalīt, izmantojot Šeplija vērtību.

#### 5.4. Izmaksu un ieguvumu analīze Safas HES

Safas hidroelektrostacijai ūdenskrātuveju ietilpība un uzstādītā jauda tiek pētītas modelī, kas sniegts 4.2. apakšnodaļā, lai salīdzinātu elektrostācijas variantu ekonomisko potenciālu. Lai šīs tehnoloģijas varētu salīdzināt, tika pieņemts, ka potenciālajiem hipotētiskajiem projektiem ir atšķirīga uzstādītā jauda un ūdens akumulācijas spēja. Ieejas parametri un aptuvenās izmaksas apkopoti 5.3. tabulā, kur redzams izmaksu novērtējums mazas, vidējas un lielas ūdenskrātuves ietilpības gadījumā 21 MW, 35 MW un 50 MW uzstādītajai jaudai. Augšbjefa spiedienaugstums ir konstants — 130 m. Katram variantam tiek aprēķināts ienesīgums; tādēļ varam novērtēt, vai pašreizējais aprēķina izplūdes apjoms 17,03 m<sup>3</sup>/s un uzstādītā jauda 21 MW ir optimāla izvēle vai ne.

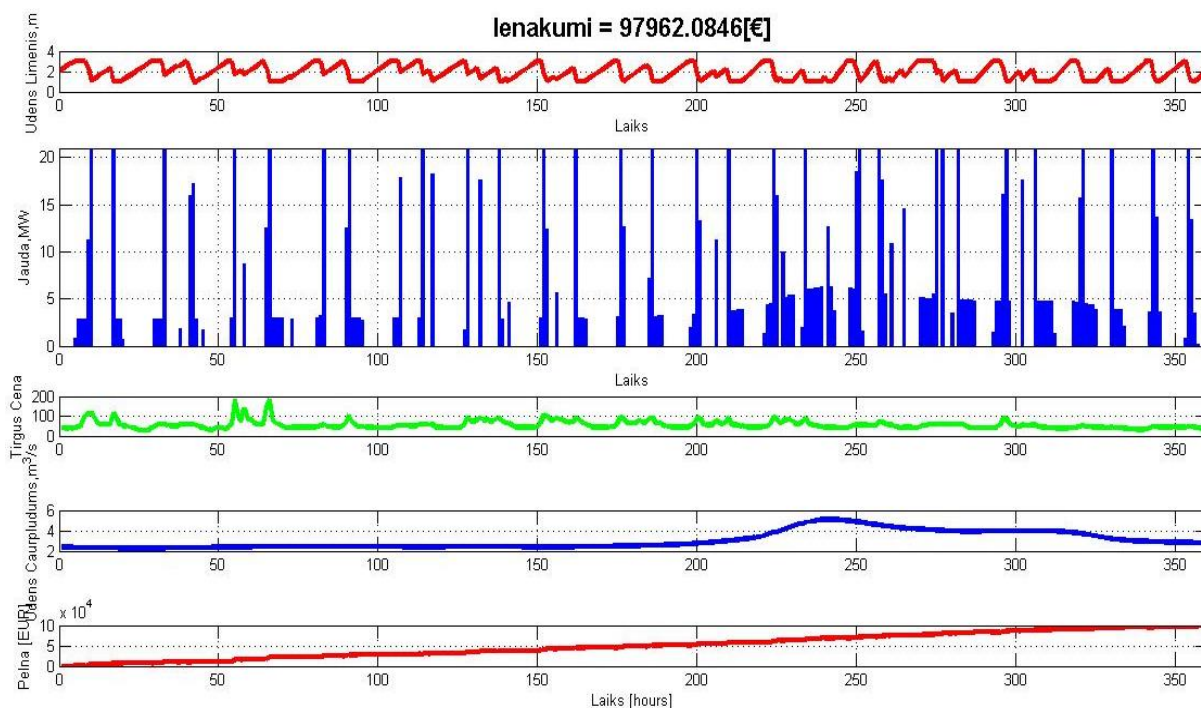
5.3. Tabula

Izmaksu novērtējums dažādiem aprēķina caurplūdumiem, ieskaitot neparedzētus izdevumus (miljonos EUR)

Jauda	Ūdenskrātuves ietilpība		
	40 ha	100 ha	200 ha
21 MW	15	15,06	15,16
35 MW	18	18,06	18,16
50 MW	21	21,06	21,16

Hydroenerģijas objektu biznesa stratēģijai objekta aprēķina caurplūdums ir vissvarīgākais rādītājs, jo atbilstoši izvēlētajam aprēķina izplūdes caurplūdumam jāprojektē visi pārējie objekta komponenti. Balstoties uz šo izvēlēto aprēķina izplūdes caurplūdumu, tiek izvēlēti savienojošā ūdens tuneļa izmēri no ūdenskrātuves uz augšbjefu, pievadkanāla diametrs un uzstādītā jauda; izejot no šiem datiem, aprēķinu ceļā noteikti neto spiedienaugstumi. Loģiskai izmaksu un ieguvumu analīzei arī ir jāņem vērā ar projektu saistītās nenoteiktības, piemēram, tehnoloģiskas problēmas, kādas varētu rasties nākotnē, iespējama ietekme uz vidi vai būvniecības aizkavēšanās.

5.10. attēlā redzama izstrādātā stohastiskās optimizācijas metode, kurā tiek ņemtas vērā ikstundas tirgus cenas un ūdens caurplūduma vērtības 360 stundu (15 diennakšu) ilgā Safas HES darbības periodā. Pirmajā grafikā attēlots ūdens līmenis ūdenskrātuvē, otrais rāda saražoto jaudu megavatos, trešais — elektroenerģijas tirgus cenas, ceturtais – dabisko ikstundas ūdens caurplūdumu upē, bet piektais — peļņu. Vidējā termiņa plānošanas īpatnība, kas jāņem vērā, ir stāvokļa 360 stundu perioda sākumā un tā beigās ietekme uz īstermiņa periodu. Optimizācija veikta trim dažādiem gadījumiem iepriekšizvēlētā laikā. Pirmajā (atsauces) gadījumā ūdenskrātuves sākotnējā un beigu aizpildījuma pakāpe ir vienāda (75 %); nākamajā gadījumā ūdenskrātuves aizpildījuma pakāpe samazinās no 100 % līdz 33 % (atbilstoši ekoloģiskajam ierobežojumam aizpildījumam jābūt vismaz 1 m, kas atbilst 33 %); visbeidzot, aizpildījuma pakāpe palielinās no 33 % līdz 100 %. Otrajā gadījumā vērojamas izmaiņas īstermiņa (diennakts) peļņā par 0,89 %, trešajā gadījumā — par 0,88 %. Tādējādi var secināt, ka ūdenskrātuves sākotnējam un beigu stāvoklim vidējā termiņa perspektīvā nav jūtama iespaids uz īstermiņa peļņas aprēķinu. Līdz ar to visi tālākie aprēķini tiek veikti, pieņemot, ka ūdenskrātuves aizpildījuma pakāpe jebkura 360 stundu perioda sākumā, kā arī tā beigās ir 75 %.



5.10. att. Izstrādātās optimizācijas programmas rezultātu pārskats 360 stundu periodā.

Šie izstrādātā algoritma optimizācijas rezultāti ļauj mums izvēlēties vislabāko īstenojamo variantu Safas HES. Tiek pieņemts, ka elektrostacijas būve ilgst 2 gadus, ražošanas periods ir 30 gadi, diskonta likme tiek izvēlēta 7 % apmērā, un izmantotas dažādas procentu likmes. Tiek pieņemts, ka hidroelektrostacijas kopējais lietderības koeficients ir konstants un vienāds ar 90 %. Transformatoru zudumi nav ņemti vērā; parazītisko enerģijas zudumu un ikgadējo ar dīkstāvi saistīto zaudējumu apmērs pieņemts 0,5 %, lai tiktu ņemti vērā dīkstāves periodi saistībā ar barošanas pārtraukumiem un ārpusplāna apkopi. Tas atbilst 2 dienām gadā. Tomēr rezultāti var par augstu novērtēt projekta peļņu un par zemu — tā izmaksas. Tika pieņemts, ka gada fiksētās ekspluatācijas un apkopes izmaksas veido 3 % no tekošā gada ienākumiem. Pilno ieguvumu un izmaksu analīzi var veikt, ņemot vērā visu iepriekšminēto.

Kā jau minēts 4.2. apakšnodaļā un 4.2. attēlā, vēlreiz uzsveram, ka modelī tiek vērtēta ikgadējo izdevumu problēma, un projekta peļņu tā dzīves cikla laikā izstrādātajā algoritmā var sadalīt 4 etapos.

1. Pirmām kārtām jāsavāc ievaddati — projekta tehniskie un finansiālie parametri, kā arī cenu statistika un prognozes. Tad nejauši tiek izvēlēts noteikts dienu skaits.
2. Katrai no izvēlētajām dienām tiek veikta vidējā termiņa optimizācija, ņemot vērā nedēļu pirms un nedēļu pēc šīs dienas, lai padarītu iespējamu plānošanu nedēļas perspektīvā un samazinātu ūdenskrātuves sākotnējā ūdens līmeņa ietekmi.
3. Pēc tam tiek veikta īstermiņa (24 stundu) optimizācija katrai no izvēlētajām dienām, lai iegūtu paredzamo dienas peļņu.
4. Iegūtie rezultāti tiek vispārināti visam gadam, lai iegūtu gada peļņu.

Lai modeli varētu izmantot tehniski ekonomiskajiem pamatojumiem, pirms tam daži no tā galvenajiem parametriem tika koriģēti, lai nodrošinātu uzticamus rezultātus. Vispirms bija nepieciešams pieņemt lēmumu par vidējā termiņa plānošanas horizonta ilgumu un ūdenskrātuves stāvokli plānošanas perioda sākumā un beigās. Otrkārt, bija jāizvēlas Montekarlo modelēšanu skaits gada laikā. Diemžēl visā plānošanas periodā ietilpstošais dienu un stundu skaits ir par lielu praktiskai īstenošanai. Lai izvairītos no šīm grūtībām, var izmantot Montekarlo metodi [50,51,52,53]. Lielāks izmēģinājumu skaits nodrošina augstāku aprēķinu precizitāti, tomēr palielinās aprēķiniem vajadzīgais laiks.



Lai noteiktu piemērotu Montekarlo izmēģinājumu skaitu, pie kura ievērojami nesamazinātos precizitāte un vienlaicīgi pārlietu nepalielinātos aprēķinu darba apjoms, veicām vairākas modelēšanas, izmantojot dažādu izmēģinājumu skaitu gadā. Atskaites gadījums ir 365 izmēģinājumi (dienas); pārējās modelēšanas, kurās izmēģinājumu skaits ir 2, 10, 40, 60, 80, 120 un 125, tiek salīdzinātas ar atskaites gadījumu, lai noteiktu kļūdu.

Visi aprēķini tika veikti ar *Intel i3* centrālajiem procesoriem, 2,53 GHz, 4 GB operatīvās atmiņas, ar operētājsistēmu *Windows 7*. Konstatējām, ka 120 izmēģinājumi (dienas) ir pietiekams skaits, jo tas neradīja pārāk lielu novērtējuma kļūdu (4,6 %), ne arī prasīja pārlietu lielu aprēķinu laiku (105 minūtes). Iespējams veikt uzlabojumu, ieviešot efektīvāku algoritmu ar labāku veiktspēju lielām lēmumu mainīgo vērtībām. Rezultāti apkopoti 5.11. att.

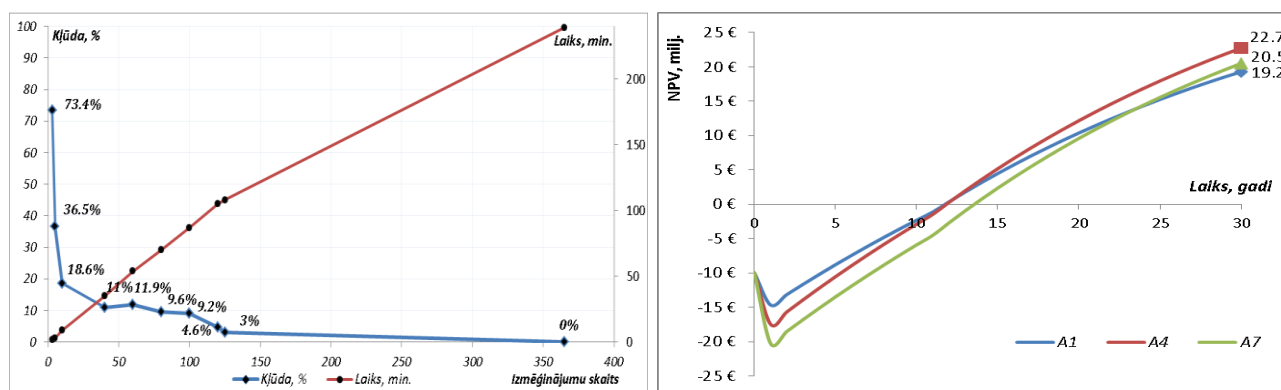
Izmaksu novērtējumi dažādām aprēķina caurplūduma vērtībām, ieskaitot neparedzētos izdevumus, kā arī iekšējās atdeves likmes un neto pašreizējās vērtības aprēķinu rezultāti 8 %, 6 % un 4 % procentu likmēm apkopoti 5.4. tabulā. Varam secināt, ka labākais variants ir izvēlēties uzstādīto jaudu 35 MW un ūdenskrātuves ietilpību 200 ha, t.i., 6. variants (A6); iekšējās atdeves likme ir 15,5 %, un peļņas sliekšņa sasniegšanai nepieciešami 12 gadi.

5.4. Tabula

Variantu tipi, neto pašreizējās vērtības un iekšējās atdeves likmes rezultāti 30 gadu periodam

Variants	Stohastiskā pieeja, 8 % procentu likme		Stohastiskā pieeja, 6 % procentu likme		Stohastiskā pieeja, 4 % procentu likme		Deterministiskā pieeja, 8 % procentu likme	
	NPV, €	IRR, %	NPV, €	IRR, %	NPV, €	IRR, %	NPV, €	IRR, %
A1	19291375	14.8	20587278	15.5	21825628	16.2	19684434	15.8
A2	20885577	15.3	22186664	16.0	23429968	16.7	19628359	15.8
A3	20873252	15.3	22182978	16.0	23434537	16.7	19534901	15.7
A4	22740950	14.8	24296034	15.5	25782054	16.2	<b>21954523</b>	15.4
A5	24973700	15.4	26533967	16.2	28024941	16.9	21898448	15.4
A6	<b>25418295</b>	<b>15.5</b>	<b>26987201</b>	<b>16.3</b>	<b>28486431</b>	<b>17.0</b>	21804990	15.3
A7	20509265	13.2	22323529	13.9	24057220	14.6	19150785	13.6
A8	22414310	13.7	24233758	14.5	25972403	15.2	19094710	13.6
A9	24500152	14.3	26328239	15.0	28075139	15.7	19001252	13.5

5.11.a attēlā apkopota Montekarlo izmēģinājumu aprēķinu kļūda un aprēķinu veikšanas laiks. 5.11.b attēlā redzams neto pašreizējās vērtības aprēķinu salīdzinājums ūdenskrātuves virsmas laukumam 40 ha. Kā redzams attēlā, līkne sākas no negatīvām peļņas vērtībām sakarā ar HES būvniecības izmaksām; pēc tam tā sasniedz peļņas sliekšni, kas ir pirmais nozīmīgais solis rentabilitātes virzienā. Pēc tam HES īpašnieks sāk gūt peļņu.

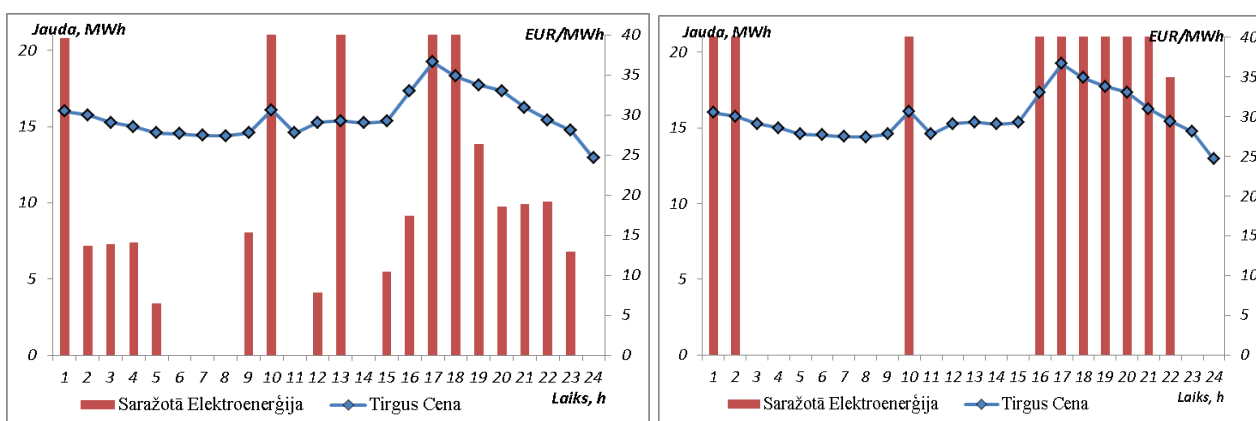


5.11. att. a) aprēķinu kļūda un aprēķinu veikšanas laiks atkarībā no Montekarlo izmēģinājumu skaita; b) neto pašreizējās vērtības salīdzinājums 40 ha ūdenskrātuvei, izmantojot stohastisko pieeju.

Ar deterministisko metodi ir neiespējami iegūt pareizās atbildes, jo netiek ņemti vērā gadījuma un nenoteiktie mainīgie.

### 5.5. Ūdenskrātuves tilpuma un diskonta likmes ietekme uz Safas HES peļņu

Izpētīsim iespējamās ūdenskrātuves tipus Safas HES. Cik lielai būtu jābūt ūdenskrātuvei? Tās tilpumu nosaka kopējā ūdens daudzuma sezonālo izmaiņu pakāpe, pieejamais ūdens daudzums, sadales līnijas caurlaides spēja un atsevišķi ģeoloģiskie nosacījumi, kas nosaka ūdenskrātuves būvi. 5.12. attēlā redzams, ka ūdens tiek uzkrāts ūdenskrātuvē un tad tiek izlaists caur turbīnu un ražo elektroenerģiju laikā, kad pieprasījums ir lielāks un cena augstāka (maksimuma stundās). Ienākumu apjoms 40 ha ūdenskrātuvei ir 6518 €, bet 200 ha ūdenskrātuvei – 6699 €; tas nozīmē, ka šī ūdenskrātuve spēj uzkrāt lielāku ūdens apjomu un ražo elektroenerģiju maksimuma stundās. Tas maksimizē ienākumus un paaugstina elektroenerģijas ražošanas elastīgumu.



5.12. att. a) tirgus cena un saražotās elektroenerģijas daudzums 40 ha ūdenskrātuvei; b) tirgus cena un saražotās elektroenerģijas daudzums 200 ha ūdenskrātuvei.

Safas HES pašreizējās ūdenskrātuves dziļums ir 3 m un virsmas laukums – 40 ha. Tehniski ekonomiskajiem pamatojumiem pieņemām četras dažādas alternatīvas; katrā no tām ir atšķirīga ūdenskrātuves konstrukcija (5.5. tab.). Iztēlosimies, ka Safas HES tiek izmantota aizsprosta tipa ūdenskrātuve, kas ir 110 m gara, 20 m dziļa, ar virsmas laukumu 200 ha. Tiek pieņemts, ka enerģijas ražotājs ir spēlētājs tirgū un var izdot elektroenerģiju tīklā; enerģijas tirgus darbība balstās uz nākamās dienas principiem. Aizsprosts ir barjera, kas aiztur ūdens plūsmas. Aizsprosta tipa ūdenskrātuves tiek būvētas ielejās, izmantojot dabisko reljefu, lai maksimāli izmantotu ūdenskrātuves virsmu. Parasti tās ir izvietotas šaurā ielejas posmā lejup pa straumi no dabiska baseina. Ielejas puses funkcionē kā dabiskas sienas, un aizsprosts izvietots šaurākajā praktiski iespējamajā vietā, lai pēc iespējas samazinātu būves izmaksas un paaugstinātu efektivitāti.

5.5. Tabula

Pētāmo elektrostaciju tehniskie un ekonomiskie parametri

	Varianti	Izmaksu novērtējums, €
<b>A1</b>	21 MW – 40 ha	15 000 000
<b>A2</b>	21 MW – 100 ha	15 060 000
<b>A3</b>	21 MW – 200 ha	15 160 000
<b>A4</b>	21 MW – 200 ha – <u>aizsprosts</u>	15 660 000

Turcijā privāti uzņēmumi saņem no valdības licenci uz 49 gadiem, un tehniski ekonomiskais pamatojums tiek izstrādāts 49 gadus ilgam periodam. Pamatojuma ekonomiskās daļas rezultāti Safas HES parādīti 5.6. tabulā; gada procentu likme ir konstanta (6 %) 10 gadu ilgam atmaksāšanās

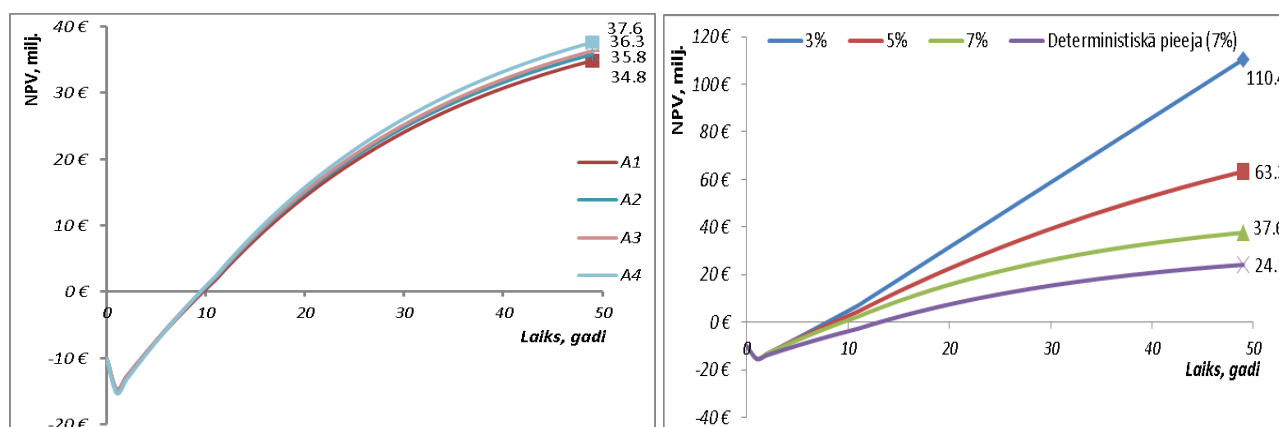
periodam visiem variantiem; deterministiskajā pieejā izmantota ikgadējā diskonta likme 7 %, stohastiskā pieeja sastāv no 3 gadījumiem, kur diskonta likme ir attiecīgi 3 %, 5 % un 7 %.

5.6. Tabula

Neto pašreizējās vērtības un iekšējās atdeves likmes rezultāti Safas HES

Varianti	Stohastiskā pieeja (1,2,3) IRR, %	Stohastiskā pieeja (1), 3 % diskonta likme	Stohastiskā pieeja (2), 5 % diskonta likme	Stohastiskā pieeja (3), 7 % diskonta likme	Deterministiskā pieeja, 7 % diskonta likme	
					NPV, €	IRR, %
<b>A1</b>	17,06 %	103154375	58966493	34879630	<b>24919374</b>	<u>14,38</u>
<b>A2</b>	17,28 %	105420216	60379112	35824568	24849173	14,33
<b>A3</b>	17,36 %	106767761	61192738	36346641	24732171	14,26
<b>A4</b>	<u>17,42 %</u>	<b>110484765</b>	<b>63344684</b>	<b>37647625</b>	24147161	13,91

Ir skaidrs, ka diskonta likme jūtami ietekmē neto pašreizējo vērtību. Piemēram, peļņai, kas aprēķināta ar diskonta likmi 3 %, neto pašreizējās vērtības ir vairāk nekā 3 reizes augstākas nekā ar diskonta likmi 7 %. Tomēr NPV izmaiņas pastiprinājās arī pie zemākām diskonta likmēm. 5.13. attēlā apkopots NPV rezultāts katram ūdenskrātuves modelim un salīdzināti NPV aprēķini dažādām diskonta likmēm 4. variantā.



5.13. att. a) neto pašreizējā vērtība dažādām ūdenskrātuvēm un dažādām kapitāla izmaksu vērtībām; b) neto pašreizējā vērtība atšķirīgiem diskonta likmes scenārijiem 4. variantam.

Apkopojot jāsaka, ka rezultāti pierāda, ka Safas hidroelektrostacijai, kura atrodas kalnainā apvidū, būtu lietderīgi izbūvēt aizsprosta tipa ūdenskrātuvi, lai uzglabātu tādu ūdens apjomu, lai sasniegtu mērķa funkciju, kas maksimizē ienākumus. Lielākā ūdenskrātuve varētu nodrošināt lielāku peļņas apjomu, izmantojot stohastisko pieeju, salīdzinājumā ar deterministisko pieeju. Diskonta likmes arī ievērojami ietekmē gūtās peļņas apjomu.

## SECINĀJUMI UN IETEIKUMI

1. Cilvēka darbība pārslogo atmosfēru ar siltumnīcefekta gāzu un oglekļa dioksīda (CO<sub>2</sub>) emisijām, kas paaugstina planētas temperatūru un rada katastrofālu, ievērojamu ietekmi uz klimatu, cilvēku veselību un vidi. Atjaunīgās enerģijas tehnoloģijām ir daudz mazāka ietekme uz vidi nekā konvencionālās enerģijas tehnoloģijām — tās ir ekoloģiski tīras un neizsmeļamas. Fosilā kurināmā avoti ir galīgi un kādu dienu izsīks.
2. Hidroenerģija ir lielisks „zaļās” enerģijas avots, jo tā ļauj samazināt globālās sasilšanas efektu un mazina valstu enerģētisko atkarību no ārvalstīm.

3. Turcija ir enerģijas importētājvalsts, tāpēc tās hidroenerģētiskā potenciāla attīstība būtu drošs iekšzemes enerģijas avots. Tādēļ Turcijas valdībai un politikas veidotājiem būtu jāatbalsta un jāveicina īpaši mazo hidroenerģētisko objektu attīstība, kam raksturīgas zemas izmaksas, vienkāršs būvniecības process; valsts rīcībā ir hidroenerģētiskais potenciāls, kas vienāds ar 14 % no Eiropas hidroenerģētiskā potenciāla.
4. MHES režīmu optimizācijas problēma ir ārkārtīgi sarežģīta un nav atrisināma, neveicot piemērotus vienkāršojumus. Tai būtu jāvar nodrošināt spēju izvēlēties darbības režīmu, iekļaujot divas alternatīvas: darbība atbilstoši garantētajai iepirkuma cenai vai darbība atbilstoši tirgus nosacījumiem.
5. Nenoteiktībai un gadījuma parādībām ir svarīga loma ieguvumu un izmaksu analīzē, kā arī optimizācijas uzdevumā. Līdz ar to modeļiem un uzdevumu risināšanas rīkiem būtu jābūt stohastiskiem.
6. Optimizācijas uzdevuma formulējums ar pieeju, kas balstās uz laika vidējās peļņas aprēķināšanu, vienkāršo stohastisko procesu modelēšanu, jo zūd nepieciešamība pēc zināšanām par to realizēšanās varbūtību.
7. Izmantotā optimizācijas procedūra, proti, kvaziņūtona metode, visos gadījumos ļāva sasniegt mērķa funkcijas globālo maksimumu.
8. Stohastisko procesu realizāciju prognozēšanu var veikt, izmantojot apmācītu mākslīgo neironu tīklu un pieņemot hipotēzi par prognozēšanas kļūdu stacionāro raksturu.
9. Izmaksu un ieguvumu analīzes rezultātu salīdzinājums rāda, ka stohastiskās metodes ļauj panākt ievērojami lielāku precizitāti nekā deterministiskais modelis. Laika, diskonta likmes un procentu likmes ietekme var ievērojami iespaidot rezultātus.
10. Tehniski ekonomiskā pamatojuma ekonomiskā daļa nosaka projekta īstenojamību, ietverot ieteikumus, kā pārvaldīt projekta dažādās stadijas. Rezultāti ļauj mums secināt, ka elektroenerģijas ražotājam jāizvēlas visefektīvākais variants; Safas HES tas bija variants ar 35 MWh uzstādīto jaudu un 200 ha ūdenskrātuves virsmas laukumu.
11. Metodes, kas balstītas uz spēļu teoriju, var palīdzēt pieņemt pareizo lēmumu par koalīciju starp tirgus spēlētājiem, publisko tirgotāju un vietējiem patērētājiem. Taisnīgai ienākumu sadalīšanai var izmantot Šeplija vērtību.
12. Stohastiskā pieeja, kas radusi lietojumu pasaulē un ir veiksmīgi izmēģināts zinātniskais un praktiskais modelis Turcijas MHES un valsts elektroenerģijas nozares kontekstā, ietver iespējamo ieguvumu analīzi, kādi paredzami vairumtirgotājiem, investoriem un ražošanas uzņēmumiem. Šī zinātniskā modeļa izmēģināšana un ieviešana atbilstoši dažādās valstīs pastāvošajiem nosacījumiem sniegs svarīgu ieguldījumu elektroenerģijas nozares attīstībā.

## IZMANTOTĀ LITERATŪRA

- [1] Satman A. Proceedings of Jeotermal Enerjiden Elektrik Üretimi Workshop, TESKON2007, 8<sup>th</sup> Ulusal Tesisat Mühendisliği Congress, Türkiye'nin Enerji Vizyonu, 25–28 October 2007, Turkey.
- [2] World Nuclear Association, World's energy demand: <http://www.world-nuclear.org/info/Current-and-Future-Generation/world-Energy-Needs-and-nuclear-power/>
- [3] British Petroleum (BP) Energy Outlook Report, 2013.
- [4] Report of Investment Support and Promotion Agency of Turkey, November 2013.
- [5] Energy White Paper. Japan Agency for Natural Resources and Energy. Tokyo, 2005 – 2 p.
- [6] Report of International Hydropower Association (IHA), The role of hydropower in sustainable development, February 2003.
- [7] Yin L., Liu X. Optimal Operation of Hydropower Station by Using an Improved DE Algorithm, China, 2009. (ISBN:978-952-5726-07-7)

- [8] Enoksson V., Svedberg F. Optimization of hydro power on the Nordic electricity exchange using financial derivatives, 2015.
- [9] Soares S., Carneiro A. Optimal Operation of Reservoirs for Electric Generation, 1991.
- [10] Reconsideration of Supporting Scheme for Renewable Energy Producers. Varfolomejeva R., Zima-Bockarjova M., Coban H., etc. In: 4<sup>th</sup> International Symposium on Environmental Biotechnology and Engineering (4ISEBE): Book of Abstracts, Cinvestav, Mexico, 2014 – pp. 62–63. (ISBN 978-607-9023-24-9)
- [11] Sithideth P., A speech about Energy Policy in Lao People's Democratic Republic (PDR), The Institute of Energy Economics, Tokyo, Japan, 2011.
- [12] Vongsay A., Bounsou X. Journal of Automation and Control Engineering. vol. 2, issue 2, Sustainable Management of Small Hydropower for Rural Electrification in Lao PDR by Economic, Social and Environment Blueprint Perspective, June 2014.
- [13] Askja Energy, 2012 report: <http://askjaenergy.com/2012/05/30/secure-icelandic-hydropower/>
- [14] Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation, Edenhofer O., Pichs-Madruga R., Sokona Y., etc. 2012 – 7 p. (ISBN:978-92-9169-131-9)
- [15] Renewable energy technologies: cost analysis series International Renewable Energy Agency (IRENA Working Paper), vol. 1, issue 3/5, 2012.
- [16] Foran T., Wong T., Kelley S. Mekong hydropower development: a review of governance and sustainability challenges, M-POWER Research Network, Finland, 2010.
- [17] Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation, Edenhofer O., Pichs-Madruga R., Sokona Y., etc. 2012 – 7 p. (ISBN:978-92-9169-131-9)
- [18] International Hydropower Association (IHA). Hydropower and the World's Energy Future. Compton, West Sussex, United Kingdom, 2010.
- [19] Official Journal of the European Union, Directives 2001/77/EC and 2003/30/EC 8<sup>th</sup> article. 23 April 2009.
- [20] International Hydropower Association (IHA), Hydropower Status Report, 2015 – 63 p.
- [21] Turkish electricity transmission company (TEİAŞ), monthly report, Ankara Turkey, 03.02.2016.
- [22] Report of Energy Market Regulatory Authority (EMRA) of Turkey, Turkey, 2012.
- [23] Toossi R., Verve Publishers:Energy and the Environment: Resources, Technologies, and Impacts, 2009 – 67 p. (ISBN:9781427618672)
- [24] Korkmaz O. Thesis: A case study on feasibility assessment of small hydropower scheme, 20 p. Turkey, 2007.
- [25] Manser J. Feed-in Tariffs and Economic Profit of Small Hydropower Plants in Switzerland, Zürich, Switzerland, March 2011.
- [26] The Role of Pumped Storage Hydro Resources in Electricity Markets and System Operation, Ela E., Kirby B., Botterud A. and etc, USA, 2013.
- [27] Suwa A. How Things Work: Micro Hydroelectricity in Japan, UN. University, 2009.
- [28] Energies. Tools for Small Hydropower Plant Resource Planning and Development: A Review of Technology and Applications Punys P., Dumbrasukas A., Kvaraciejus A., etc, 2011 (ISSN:1996-1073)
- [29] Clean energy project analysis: Retscreen engineering, cases textbook, 2005 (ISBN:0662-39191-8)
- [30] Sharma S. The University of Texas, Feasibility study of options for aging hydro-power generation facility, USA, 2006 – 108 p.
- [31] US Fish and Wildlife Service, Black R., McKenney B., Unsworth R., etc. Economic analysis for hydropower project relicensing: guidance and alternative methods, USA, 1998.
- [32] Foundation for Water and Energy Education: <http://fwee.org/nw-hydro-tours/how-wind-turbines-generate-electricity/integration-with-hydropower-the-power-grid/>
- [33] Hydro Review Worldwide Magazine (HRW), Fernández Centeno M., Marrero Quevedo A., Manuel Quintero Gutiérrez J., and etc. Creating a Hybrid Hydro-Wind System on a Spanish Island, October 2012.

- [34] Ye M., Junjie Y. International Conference on Logistics Engineering, Management and Computer Science (LEMCS), Evolutionary Game Analysis of Water Resources Conflict for Cascade Hydropower Stations in Multiple Power Generation Subjects, China, 2014. (DOI:10.2991/lemcs-14.2014.214)
- [35] Manual addressed to stakeholders with the description of methodologies to improve SHP implementation, Alterach J., Popa B., Magureanu R., etc. 2010 – pp. 5–7.
- [36] International Journal of Hydrogen Energy. Sauhats A., Coban H.H., Baltputnis K., etc. Optimal investment and operational planning of a storage power plant, April, 2016 (DOI:10.1016/j.ijhydene.2016.03.078)
- [37] Zhao T., Zhao J. Mathematical Problems in Engineering, vol. 12, Optimizing Operation of Water Supply Reservoir: The Role of Constraints China, 2014. (DOI:10.1155/2014/853186)
- [38] Moreno S.R., Kaviski E. Pesquisa Operacional Journal, vol. 35, issue 1, Daily scheduling of small hydro power plants dispatch with modified particles swarm optimization, 2013 – pp. 25–37.
- [39] Sauhats, A., Moskins I. Power and Electrical Engineering, vol. 31, Transmission and Optical Networks Creating by Using a Cooperative Game Theory Approach, 2013 – pp. 25–30. (ISSN:14077345)
- [40] Calvo E., Lopez E. Discussion Papers in Economic Behaviour, A strategic approach for the discounted Shapley values, Spain, 2014.
- [41] IEEE 15<sup>th</sup> International Conference on Environment and Electrical Engineering, Sauhats A., Varfolomejeva R., Petricenko R., etc. A Stochastic Approach to Hydroelectric Power Generation Planning in an Electricity Market, Italy, 2015 – pp. 883–888. (ISBN:978-1-4799-7992-9)
- [42] Grinstead C.M., Snell J.L. Introduction to Probability. Publisher: American Mathematical Society, USA, 1997 – 133 p. (ISBN:978-0821807491)
- [43] Hydrologic Engineering Center, U.S. Army corps of engineers. Feasibility Studies for Small Scale Hydropower Additions: Hydrologic Studies, Volume: 1, 2, 3. 1979.
- [44] Union of Chambers of Turkish Engineers and Architects (TMMOB) Report: Hydropower Plants, Turkey, October 2011.
- [45] Nord-pool-spot electricity prices:  
<http://www.nordpoolspot.com/Market-data1/Elspot/Area-Prices/ALL1/Hourly/?view=table>
- [46] Kumbaroğlu G., Madlener R., Demirel M. Energy Economics Journal, vol. 30, issue 4, A real options evaluation model for the diffusion prospects of new renewable power generation technologies, 2008 – pp. 1882–1908. (doi:10.1016/j.eneco.2006.10.009)
- [47] Hunt L.C., Dilaver Z. Energy Policy Journal, vol. 39, issue 6, Modeling and forecasting Turkish residential electricity demand, June 2011 – pp. 3117–3127. (ISSN:1749-8384)
- [48] Second ENEFM Conference Proceedings, Coban H.H., Varfolomejeva R., Sauhats A., etc., Hydropower Plant Regime Management According to the Market Conditions, 2014 – pp. 141–152. (ISBN:9783319169019)
- [49] Small Hydropower Plants Operations Optimization in the Market Conditions. IEEE 2<sup>nd</sup> Workshop on Advances in Information, Electronic and Electrical Engineering, Coban H.H., Varfolomejeva R., Sauhats A. and etc. Vilnius, Lithuania, 2014. (ISBN:978-1-4799-7123-7)
- [50] Khindanova I. Journal of Applied Business and Economics, vol. 15, issue 1, A Monte Carlo Model of a Wind Power Generation Investment, 2013 – pp. 94–106.
- [51] Fleten S.E., Wallace W.S. Optimization in the Energy Industry, Springer, Delta-Hedging a Hydropower Plant Using Stochastic Programming, 2009 – pp. 515–532.
- [52] Lundmark R., Pettersson F. IAEE Int. Energy Conf. Bridge, Energy Supply Demand Logist. Compet. Environ., Investment decision and uncertainty in the power generation sector. Istanbul: IAEE; 2008 – pp. 1–14.
- [53] Zakeri B., Syri S. Electrical energy storage systems: A comparative life cycle cost analysis. Renew Sustain Energy, 2015. (DOI:10.1016/j.rser.2014.10.011)