

# KATKONNANOHJAUS EVOLUUTIOLASKENNAN KEINAIN - ASKEL KOHTI OPTIMAALISTA TAVARALAJIJAKOA

Veli-Pekka Kivinen  
HY, Metsävarojen käytön laitos

## Seminaariesitelmän lyhennelmä

Hakkuukoneissa runkojen katkontaa kohti tuotantolaitoksen asettamaa tavoitetta ohjataan yleisimmin niin kutsuttujen arvo- ja jakaumamatriisien avulla. Arvomatriisi, jota yleisesti myös hintalistaksi kutsutaan, on kaksiulotteinen taulukko, jossa on määritelty kunkin tietynpituisen ja -läpimittaisen pölkyn arvo suhteessa muihin kyseisen puutavaralajin pölkkyjen pituus-läpimitta -yhdistelmiin. Jakaumamatriisi on puolestaan tarvejakaumataulukko, joka kertoo pölkkyjen tavoiteosuuden kullekin pituuden ja läpimitan yhdistelmälle. Rungon hakkuun aikana hakkuukone valitsee pölkkytysvaihtoehdon, joka maksimoi arvomatriisien ja rungon geometrian perusteella lasketun rungon arvon (arvoapteeraus). Puhdas arvoapteeraus johtaa kuitenkin leimikkotasolla herkästi epätyytyttävään tukkijakaumaan, minkä vuoksi hakkuukone yleensä ohjaa aktiivisesti katkontaa kohti haluttua tukkijakaumaa (jakauma-apteeraus). Tämä voi tapahtua joko säätämällä arvomatriisia tavoitejakaumaa paremmin toteuttavaan suuntaan (ns. adaptiivinen I. mukautuva hintalista) tai valitsemalla käsiteltävän rungon kohdalla pölkkytysyhdistelmä, joka toteuttaa jakaumatavoitetta parhaiten mutta jonka arvo samalla eroaa korkeintaan sallitun maksimimäärän (esim. 5 %) arvoapteerauksen optimipölkkytyksen mukaisesta rungon arvosta (lähioptimaalimenetelmä).

Hakkuukoneiden apteerausta ohjaavien matriisien laadinta ja säätö ovat toistaiseksi perustuneet pitkälti yrittä ja erehdy –menetelmään: toimihenkilöt hankintaorganisaatioissa ovat rakentaneet vaihtoehtoisia matriisikombinaatioita ja testanneet niiden toimivuutta hakkuukoneiden katkontaprosessia jäljittelevien katkontasimulaattoreiden avulla. Monesti toimivat ohjausmatriisit ovat löytyneet vasta pitkän ajan kuluessa, kun kokemuksi on kertynyt erilaisista matriisikombinaatioista puustoltaan erilaisissa leimikko-olosuhteissa. Keskeisenä lähtökohtana on useimmiten ollut, että sen paremmin arvo- kuin tavoitematriiseja ei hyödytä säätää leimikkokohtaisesti, vaan paras tulos saavutetaan, kun kaikki kohteet hakataan samoilla ohjausmatriiseilla. Tämä periaate ei kuitenkaan perustu kovin syvälliseen tieteelliseen analyysiin, vaan on pikemminkin muovautunut vallitsevaksi käytännöksi varteenotettavien arvo- ja etenkin tavoitematriisien säätö- ja laadinta-menetelmien puuttuessa. Perustellusti voidaan kuitenkin olettaa, että tietty sama arvomatriisi ei välttämättä toimi yhtä hyvin kaikissa leimikoissa tai että samalla tavoitejakaumalla hakattaessa kokonaistulos ei välttämättä ole paras mahdollinen. Kun matriisien muodostamiseen ja muokkaamiseen ei ole luotu testattua systematiikkaa eikä käytettävissä ole kovinkaan analyttisiä työkaluja, muutosten huomioon ottaminen on aina työläämpää eikä ohjausmatriiseihin tehtyjen muutosten toimivuudesta ole välttämättä varmuutta.

Toinen keskeinen kysymys katkonnanohjauksessa liittyy siihen, miten syntynyttä katkontatulosta pitäisi mitata/arvottaa. Perinteisesti toteutunutta tukkijakaumaa on verrattu tavoitteeksi asetettuun jakaumaan jakauma-asteeksi kutsutulla mittarilla. Jakauma-aste on

suhteellisen yksinkertainen käyttää ja se tuottaa aina mielekkään tuloksen väliltä 0...1 (0...100 %). Jakauma-aste antaa kuitenkin saman painoarvon jokaiselle tukkiluokalle ellei sitten käytetä jotakin painotussysteemiä. Toinen, jo hieman vaikeampi ongelma on, että jakauma-aste ei ota mitenkään huomioon tavoitematriisin kokoa (s.o. tavoitematriisin tukkiluokkien lukumäärää). Näin ollen ongelmaksi muodostuu, miten vertailla esimerkiksi simulaattorin tuottamia katkontoja kahdella erikokoisella tavoitejakaumalla samassa leimikossa.

Kolmas kysymys katkonnanohjauksessa liittyy tavaralajijakoon, sillä ennen hakkuuta on päätettävä, mitä tavaralajeja kustakin leimikosta hakataan. Luonnollisesti vapaa tavaralajivalinta ei ole nykyisessä tavaralajihinnotteluun perustuvassa puukaupassa mahdollista, sillä kauppakirjassa yleensä sovitaan leimikosta valmistettavat tavaralajit eikä tästä sopimuksesta voida poiketa merkittävästi ainakaan ilman erillistä uutta sopimusta. Joka tapauksessa, jos puu hinnoteltaisiin runkoina tavaralajien sijasta, tavaralajien allokointi eri leimikoihin saisi huomattavasti suuremman merkityksen. Perinteisesti on nähty, että tavaralajiallokointia pitää tarkastella omana erillisenä ongelmanaan eikä sitä tule integroida päätökseen siitä, minkäpituisia ja -läpimittaisia tukkeja kustakin leimikosta hakataan.

Tutkimushankkeen tässä osiossa on keskitytty tarkastelemaan sitä, miten katkontaa ohjaavat arvo- ja tavoitematriisit pitäisi asettaa, jotta annetut tavoitejakaumat saavutettaisiin mahdollisimman hyvin. Tarkastelu kulminoituu paljolti kysymykseen: hakatako kaikki leimikot samoilla ohjausmatriiseilla vaiko leimikkokohtaisesti säädetyillä matriiseilla. Oletamus on, että jos meillä olisi käytettävissä runkotason ennakkotietoa hakattavista kohteista, me tämän tiedon perusteella voisimme säätää kokonaisuuden kannalta optimaaliset arvo- ja/tai tavoitematriisit kuhunkin leimikkoon kullekin tukkitavaralajille (tukkityyppille). Tätä oletamusta testataan optimoimalla kuhunkin leimikkoon omat ohjausmatriisit geneettisellä algoritmilla ja hakkaamalla leimikot katkontasimulaattorilla säädettyjen matriisien ohjaamina. Katkontatulosta arvioidaan nimenomaan kokonaistasolla – yli kaikkien leimikoiden; emme ole siis kiinnostuneita maksimoimaan toteutuneen tukkijakauman ja tavoitejakauman yhteensopivuutta niinkään yksittäisessä leimikossa kuin kokonaisuutena. Tämä merkitsee, että jossakin leimikossa voimme 'tinkiä' katkonnasta kokonaisuuden eduksi. Koska algoritmi voi optimoida useiden tavaralajien ohjausmatriiseja samanaikaisesti, se yhdistää näin ollen tavaralajiallokoinnin matriisien optimointiin; kyseessä on siis kokonaisoptimointi yli tavaralajien ja yli leimikoiden.

Arvomatriisien ja tavoitejakaumien optimointi perustuu geneettiseen algoritmiin (GA). Geneettiset algoritmit yhdessä evoluutiostrategioiden ja evoluutio-ohjelmoinnin kanssa muodostavat kokonaisuuden, josta käytetään nimitystä evoluutiolaskenta. Perusperiaatteena näissä kaikissa kolmessa menetelmässä on jäljitellä genetiikasta tuttua luonnonevoluutiota: 1) Luodaan esitettyyn ongelmaan joukko (populaatio) aloitusratkaisuja joko täysin satunnaisesti (jos ei ole mitään käsitystä millainen olisi hyvä ratkaisu käsillä olevaan ongelmaan) tai jotakin ennakkotietämystä hyödyntäen. 2) Lasketaan kullekin ratkaisuyritteelle sen hyvyttä kuvaava tunnusluku (fitness value) evaluointikriteerin pohjalta. 3) Jos on saavutettu tyydyttävä tulos, lopetetaan paremman ratkaisun etsintä. Jos taas ei olla tyytyväisiä toistaiseksi parhaaseen ratkaisuun, jatketaan etsintää luomalla uusi populaatio olemassa olevasta ratkaisujoukosta a) valitsemalla parhaat yrittävät jatkoon b) risteyttämällä näitä jatkoon valittuja satunnaisesti keskenään ja c) lopuksi altistamalla valinnan ja risteytyksen tuloksena syntyneet uudet yksilöt satunnaisten muutosten

(mutaatioiden) kohteeksi. 4) Lasketaan kullekin uuden populaation jäsenelle hyvyysarvo ja jatketaan etsintää.

Tavallisesti ratkaisuyritteet on geneettisissä algoritmeissa koodattu nolliasta ja ykkösistä koostuvina bittijonoina; puhutaan binäärikoodauksesta. Arvo- tai tavoitematriiseja olisi kuitenkin epätarkoituksenmukaista esittää nolliasta ja ykkösistä koostuvina lukujonoina, koska ne kasvaisivat tällöin huomattavan pitkiksi. Tästä syystä ratkaisuyritteet on esitetty normaaleina reaalitylukumatriiseina siten, että kussakin yrittessä ( $m$  kpl) on oma matriisinsa kunkin leimikon ( $n$  kpl) jokaiselle optimoinnissa olevalle tukkitavaralajille ( $k$  kpl). Ratkaisuyritteet ovat siis komiulotteisia matriisijonoja, joissa perusyksikkönä on kaksiulotteinen taulukko (joko arvo- tai tavoitematriisi).

Jotta mitään voitaisiin optimoida ja säätää, tarvitaan runkotason tietoa hakattavista leimikoista. Optimointialgoritmi hyödyntää normaalia STM-formaatissa olevaa runkodataa. Algoritmissa on valmius lukea laaturaja(t) runkokäyrältä, mikäli tällaista tietoa on tarjolla. Kuitenkaan tätä laaturajatieta ei vielä toistaiseksi hyödynnetä ohjausmatriisien optimoinnissa. Runkodata voi olla joko hakkuukoneen tallentamaa todellista dataa tai sitten ennakkomittauksen perusteella generoidun runkojoukon dataa.

Optimointi käynnistyy alustamalla matriisipopulaatio satunnaisesti. Tämän jälkeen kunkin leimikon tarkastelun kohteena olevan puulajin rungot katkotaan puhtaalla arvoapteerauksella dynaamista ohjelmointia hyväksi käyttäen eri tavaralajeiksi. Kunkin tukkitavaralajin pölkkyjakaumat summataan yhteen yli kaikkien leimikoiden ja näin saatua kokonaisjakamaa verrataan kyseisen tavaralajin tavoitejakamaan tilastotieteessä yleisesti kahden jakauman yhteensopivuuden testaamiseen käytetyn khi-toiseen testisuureen avulla. Jotta kunkin ratkaisuyritteen hyvyttä voitaisiin kuvata vain yhdellä yksiselitteisellä tunnusluvulla, tavaralajettaiset khi-toiseen arvot summataan edelleen yhteen ja näin saadun khi-toiseen kokonaisarvon perusteella lasketaan kontingenssikerroin, joka muuntaa tuloksen välille  $0..1$  (0 tarkoittaa täydellistä yhteensopivuutta toteutuneiden tukkijakaumien ja tavoitteeksi asetettujen jakaumien välillä, kun taas 1 indikoi maksimaalista eroa). Kun kontingenssikertoimen arvo vähennetään ykkösestä, saadaan hyvyysarvo 'oikeinpäin': 0 tarkoittaa täydellistä epäyhteensopivuutta jakaumien välillä ja 1 identtisiä jakaumia.

Uusi populaatio ratkaisuyritteitä I. matriisijonoja muodostetaan valitsemalla ensin tietty osuus parhaita (hyvyysarvoltaan suurimpia) yritteitä olemassa olevasta populaatiosta. Tämä on ns. elitistinen valintatapa ja vakiintunut tapa, jota myös tässä on sovellettu, on valita kolmasosa parhaista jatkoon. Loput kaksi kolmasosaa uuden populaation matriisijonoista muodostetaan risteyttämällä satunnaisesti kahden jo jatkoon valitun jonon matriiseja keskenään leimikko- ja tavaralajipohjalta (s.o. saman leimikon ja saman tavaralajin matriiseja risteytetään). Risteytys on toteutettu uniform crossover –operaattorin avulla. Kun uusi populaatio matriisijonoja on näin muodostettu, jokaisen jonon kunkin leimikon jokaisen tavaralajin matriisiin jokaisella solulla (tukkiluokan arvolla) on pieni todennäköisyys mutatoitua. Mutaatio-operaattorina on käytetty korvausta satunnaisluvulla sallitulta arvoalueelta. Iteraatiokierrosten lukumäärä annetaan parametrinä. Yhden optimointikierroksen kesto määräytyy laskennassa mukana olevien leimikoiden lukumäärän ja koon, optimoitavien tavaralajien lukumäärän sekä tavaralajeittaisten jakaumatavoitteiden mukaan.

Kannattaisiko tavaralajeittaisia kokonaistavoitteita sitten säätää leimikkokohtaisesti. Jotta tähän kysymykseen voitaisiin vastata, pitäisi ensin kehittää metodiikka leimikkokohtaisen

tavoitejakaumien generoimiseksi. Yksi tapa osittaa kokonaistavoite leimikkokohtaisiin osatukkitavoitteisiin on etsiä GA:lla optimaaliset arvomatriisit kuhunkin leimikkoon ja edelleen hakata jokainen leimikko sille säädetyillä arvomatriiseilla ja ottaa näin muodostuvat tukkijakaumat tavoitteiksi varsinaiseen hakkuuseen. Ongelmana tällaisessa epäsuorassa optimoinnissa on, että tavoitteista tulee usein hyvin 'reikäisiä'; s.o. vain muutama tukkiluokkaan tulee tavoiteosuus eikä tällainen tavoitejakauma ole siten omiaan parantamaan tavoitejakauman saavuttamista.

Lähtökohtaisesti tavoitejakauma ilmaisee kunkin tukkiluokan haluttavuuden eli prioriteetin: mitä suurempi tavoiteosuus, sitä suurempi haluttavuus. Toisin sanoen tavoitejakauma voidaan tulkita tukkien eri pituus-läpimitta –yhdistelmienprioriteettilistaksi. Jos edelleen tulkitaan nämä prioriteetit hinnoiksi, voidaan apteerausta ohjata pelkällä tavoitejakaumalla seuraavasti: 1) Hakataan ensimmäinen tarkasteltavan puulajin runko aloitus-tavoitejakaumalla (oletetaan nyt, että katkonnassa mukana vain yksi tukkitavaralaji). 2) Päivitetään tavoitejakauma eli prioriteettalista vertaamalla kumulatiivista toteutunutta tukkijakaumaa tavoitejakaumaan Bergstrandin (1989) tukkiluokkien prioriteetin päivitykseen lähioptimaalimenetelmää varten kehittämällä kaavalla. 3) Hakataan seuraava runko uudella päivitetyllä tavoitejakaumalla. Näin menetellen edetään runko rungolta, kunnes koko leimikko on hakattu. Nyt geneettisen optimointialgoritmin tapauksessa, muodostetaan satunnaisesti joukko tavoitejakaumajonoja: yksi jakauma kunkin leimikon kullekin tavaralajille. GA:n tehtävänä on sitten lähteä jalostamaan näistä aloitusmatriiseista edellä kuvatun katkontaproseduurin pohjalta optimaalisia tavoitteita kunkin leimikon kullekin tukkitavaralajille.

Kehitettyä geneettistä optimointialgoritmia on toistaiseksi ehditty 'ajaa' hyvin niukasti. Alustavien kokeilujen perusteella algoritmi toimii ainakin teknisesti hyvin, sillä parhaan ratkaisuyrittteen hyvyys näyttää paranevan etsinnän edetessä ripeästi ja lopulta konvergoituvan odotetulla tavalla. Algoritmin parametrien optimaalisessa asettamisessa riittää kuitenkin paljon työtä. Samoin työtä on tehtävä, jotta algoritmin esittämä tilanne vastaisi enemmän todellisuutta: toistaiseksi eri tukkitavaralajeille ei voida antaa määrärajoitteita eikä algoritmi ota optimoinnissa huomioon muita tekijöitä kuin katkontatuloksen vastaavuuden tavoitteeseen; esimerkiksi kuljetusetäisyys leimikolta eri jalostuspaikoille vaikuttaa usein ratkaisevasti ainakin siihen, mitä tavaralajeja leimikosta kannattaa hakata. Kaikista keskeisin asia katkonnanohjauksen optimoinnissa on kuitenkin, että meillä on tarkkaa ja luotettava ennakkotietoa hakkuuseen tulevista leimikoista: Paraskaan optimointilaskenta ei tuota optimaalisia katkontaohjeita, jos meillä ei ole luotettavaa kuvaa hakattavien leimikoiden puuston ominaisuuksista.