

Helen Sähköverkko Oy:n tilaustutkimus

TUNTIMITTAUS- JA AVOIMEEN DATAAN PERUSTUVA
KUORMITUSMALLINNUS

Vaihe 2: Rakennustietojen hyödyntäminen kuormitusmallinnuksessa

Antti Mutanen, Kimmo Lummi ja Pertti Järventausta
Sähkötekniikan yksikkö, Tampereen yliopisto
joulukuu 2020

Sisällysluettelo

| | |
|---|----|
| 1) Johdanto | 1 |
| 2) Tutkimusaineisto..... | 1 |
| 2.1. Tuntimittaukset ja käyttöpaikkatiedot | 1 |
| 2.2. Kiinteistö- ja rakennustiedot..... | 1 |
| 2.3. Lämpötilamittaukset..... | 2 |
| 3) Tutkittavien rakennusryhmien valinta | 2 |
| 4) Kirjallisuusselvitys rakennusten kulutuksen mallintamisesta..... | 3 |
| 5) Vuosienergiankulutuksen mallintaminen | 5 |
| 5.1. Lähtötiedot..... | 5 |
| 5.2. Korrelaatioanalyysi..... | 5 |
| 5.3. Outliereiden suodatus | 6 |
| 5.4. Ristiinvalidointi ja muuttujien lukumäärän valinta..... | 7 |
| 5.5. Lopullisen mallin muodostus | 8 |
| 5.6. Vuosienergiamallien yhteenveto | 8 |
| 6) Huipputehon mallintaminen..... | 12 |
| 7) Kulutusprofiilin mallintaminen | 12 |
| 7.1. Kuormitusprofiilien laskenta ja mallinnus | 12 |
| 7.2. Kuormitusprofiilimallinnuksen tuloksia | 15 |
| 8) Huomioita regressiomalleista | 18 |
| 9) Yhteenveto..... | 18 |
| Lähteet..... | 19 |

1) Johdanto

Helen Sähköverkko Oy:n (HSV) tilaaman kuormitustutkimuksen ensimmäisessä vaiheessa klusteroitiin käyttöpaikkoja ja liittymiä samalla tavalla käyttäytyviin ryhmiin. Klusterointi tehtiin puhtaasti tuntimittausten perusteella, ja käytettävissä olleita taustatietoja: HSV:n järjestelmistä saatuja asiakas- ja ryhmittelytietoja sekä avoimena datana saatavia tietoja rakennuksista ja kiinteistöistä, hyödynnettiin ainoastaan klustereiden nimeämisessä.

Tässä raportoidussa kuormitustutkimuksen toisessa vaiheessa tutkittiin, miten rakennustietoja voidaan käyttää selittämään eri tyyppisten rakennusten sähköenergian kulutuksen määrää ja ajallista vaihtelua. Tässä laajuudeltaan rajoitetussa tutkimuksen toisessa vaiheessa yhdistetään alkuperäisen tutkimussuunnitelman vaiheiden kaksi ja kolme tavoitteita siten, että tutkimuksen tuloksia voidaan hyödyntää sekä asiakaskohtaisten vertailukäyrien muodostamisessa että suunnittelun apuna arvioitaessa erityyppisten, -kokoisten ja -ikäisten rakennusten huipputehoja. Vaiheeseen kolme alun perin suunniteltu tulevaisuudessa merkittävien kuormien ja pientuotannon mallinnus ja ennustaminen on rajattu tämä tutkimuksen ulkopuolelle.

2) Tutkimusaineisto

2.1. Tuntimittaukset ja käyttöpaikkatiedot

Kuten kuormitustutkimuksen 1. vaiheessa, nytkin käytettävissä oli sähkönkulutuksen tuntimittaukset kolmen vuoden ajalta (2016–2018) lähes kaikilta HSV:n käyttöpaikoilta. Kaikkien käyttöpaikkojen tuntimittauksia ei kuitenkaan hyödynnetty, ainoastaan luvussa 3 valittujen rakennusten mittauksia (yhteensä 12671 kiinteistöä, jotka sisältävät 268016 käyttöpaikkaa) käytettiin tässä tutkimuksessa.

Tuntimittaustietojen lisäksi käytettävissä oli seuraavat HSV:ltä saadut käyttöpaikkakohtaiset tiedot:

- Käyttöpaikkatunnus
- Liittymätunnus
- Vaiheiden lukumäärä ja sulakekoko (A)
- Siirtotuotetunnus
- Forum business group
- Luokittelu verkkotietojärjestelmässä (≈SLY/Sener-ryhmä)

2.2. Kiinteistö- ja rakennustiedot

HSV:ltä saatiin tässä tutkimuksessa käytettäväksi myös liittymiin valmiiksi yhdistetyt kiinteistö- ja rakennustiedot, jotka sisälsivät mm.

- Kiinteistötunnukset
- Rakennustunnukset
- Rakennuksen tyyppi
- Rakennuksen käyttötarkoituksen
- Rakennusten pinta-alat
- Kantavan rakenteen materiaalin
- Julkisivumateriaalin
- Lämmitystavan
- Kaupunginosat osa-alueittain

2.3. Lämpötilamittaukset

Kuten 1. vaiheessa, myös toisessa vaiheessa käytettiin Ilmatieteen laitoksen avoimesta tietokannasta haettuja tunneittaisia lämpötilamittauksia. Helsingin alueen pitkän ajan (30 vuotta) kuukausikeskilämpötilat etsittiin niin ikään avoimena datana saatavasta keskilämpötilataulukosta.

3) Tutkittavien rakennusryhmien valinta

Kuormitustutkimuksen vaiheen kaksi ensimmäinen tehtävä oli tutkittavien rakennusryhmien valinta. Tutkittaviksi valitut 19 rakennusryhmää on lueteltua taulukossa 3.1. Muutamia mielenkiintoisia rakennusryhmiä jouduttiin jättämään tarkastelun ulkopuolelle, joko tarkasteltavien rakennusryhmien lukumäärän rajoittamiseksi (esim. paritalot) tai sen takia, että niitä edustavia rakennuksia ei löytynyt riittävästi (esim. terveydenhuolto).

Tarkasteltavia kiinteistöjä valitessa sekä käyttöpaikkatiedoista saatavia luokittelutietoja (SLY/Sener ja Business Forum –luokittelut) että rakennustiedoista saatavia rakennustyyppi-, käyttötapa-, lämmitystapa-, ja polttoainetietoja ristiinvertailtiin ja analysoitaviksi valittiin ainoastaan ne kiinteistöt, joissa tiedot kummassakin datalähteessä vastasivat toisiaan. Lisäksi analysoitavat kiinteistöt suodatettiin taulukossa 3.2 esitetyillä suodatusehdoilla. Näiden suodatusehtojen tarkoituksena oli suodattaa pois kiinteistöt, joilla on useampaan kuin yhteen rakennusryhmään kuuluvia rakennuksia tai joiden kulutusprofiili poikkeaa asumiselle tai muulle kulutukselle ominaisista profiileista. Jälkimmäisessä suodatuksessa hyödynnettiin kuormitustutkimuksen vaiheen yksi klusteroinnin tuloksia.

Taulukko 3.1. Tutkitut rakennusryhmät ja niitä edustamaan valittujen kiinteistöjen ja käyttöpaikkojen lukumäärät.

| | Kiinteistöjen lkm | Käyttöpaikkojen lkm |
|--|-------------------|---------------------|
| Omakotitalot | | |
| Suora sähkölämmitys | 999 | 999 |
| Suora sähkölämmitys+käyttöveden lämmitys yö sähköllä | 970 | 970 |
| Varaava sähkölämmitys | 259 | 259 |
| Kaukolämpö | 1058 | 1058 |
| Kevyt polttoöljy | 1295 | 1295 |
| Maalämpöpumppu | 848 | 848 |
| Rivitalot | | |
| Suora sähkölämmitys | 169 | 1003 |
| Suora sähkölämmitys+käyttöveden lämmitys yö sähköllä | 342 | 2253 |
| Varaava sähkölämmitys | 124 | 668 |
| Kaukolämpö | 762 | 10948 |
| Kevyt polttoöljy | 412 | 3152 |
| Maalämpöpumppu | 45 | 240 |
| Kerrostalot | | |
| Kaukolämpö | 4450 | 224252 |
| Kevyt tai raskas polttoöljy | 559 | 18984 |
| Maalämpöpumppu | 24 | 732 |
| Toimistot | | |
| Kaukolämpö | 114 | 114 |
| Kaupat | | |

| | | |
|------------------------------|-----|-----|
| Kaukolämpö tai öljylämmitys | 49 | 49 |
| Koulut | | |
| Kaukolämpö | 81 | 81 |
| Teollisuusrakennukset | | |
| Kaukolämpö tai öljylämmitys | 111 | 111 |

Taulukko 3.2. Rakennusryhmien valinnassa käytetyt lisäsuodatusehdot.

| | Rakennustietoehdot | Klusteriehdot |
|---|---|---|
| Omakotitalot | | |
| Suora sähkölämmitys | | 20<=Klusteri<=32 |
| Suora sähkölämmitys+käyttöveden lämmitys yösähköllä | | Klusteri==33 |
| Varaava sähkölämmitys | Vesikeskuslämmitys | Klusteri==34 tai 35 |
| Kaukolämpö | | 20<=Klusteri<=32 |
| Kevyt polttoöljy | | |
| Maalämpöpumppu | | |
| Rivitalot | | |
| Suora sähkölämmitys | | 6<=Liittymäklusteri <=14 |
| Suora sähkölämmitys+käyttöveden lämmitys yösähköllä | | Liittymäklusteri == 13 |
| Varaava sähkölämmitys | Vesikeskuslämmitys | 6<=Liittymäklusteri <=14 ja klusteri==34 tai 35 |
| Kaukolämpö | | 6<=Liittymäklusteri <=14 |
| Kevyt polttoöljy | | |
| Maalämpöpumppu | | |
| Kerrostalot | | |
| Kaukolämpö | Vesikeskuslämmitys, vähintään 2 kerrosta ja 3 huoneistoa | 6<=Liittymäklusteri <=14 |
| Kevyt tai raskas polttoöljy | | |
| Maalämpöpumppu | | |
| Toimistot | | |
| Kaukolämpö | Kiinteistössä vain yksi liittymä ja käyttöpaikka | Liittymäklusteri <=5 ja Klusteri<=6 |
| Kaupat | | |
| Kaukolämpö tai öljylämmitys | Max. 2 kerrosta, Kiinteistössä vain yksi käyttöpaikka ja rakennus | Klusteri<=19 |
| Koulut | | |
| Kaukolämpö | Kiinteistössä vain yksi käyttöpaikka | Klusteri<=16 |
| Teollisuusrakennukset | | |
| Kaukolämpö tai öljylämmitys | Kiinteistössä vain yksi käyttöpaikka | Klusteri<=19 ja Liittymäklusteri<=5 |

4) Kirjallisuusselvitys rakennusten kulutuksen mallintamisesta

Lyhyellä kirjallisuuskatsauksella selvitettiin, mitä menetelmiä maailmalla on käytetty rakennusten energian- tai sähkönkulutuksen mallintamiseen ja mitkä ovat olleet merkittävimmät kulutukseen vaikuttavat rakennusten parametrit. Wei et al. (2015) havaitsivat suorittamissaan herkkyystarkasteluissa, että rakennuksen lattiapinta-ala on tärkein selittävä muuttuja ennustettaessa

rakennuksen neliometrikohtaista vuosittaista sähkönkulutusta ja kerrosten lukumäärä puolestaan selittää parhaiten neliometrikohtaista lämmitysenergian tarvetta. Godoy-Shimizu et al. (2018) raportoivat tutkimuksessaan toimistorakennusten neliometrikohtaisen sähkön ja lämmitysenergian tarpeen lisääntyvän kerrosten lukumäärän kasvaessa. Tulokset viittaavat myös siihen, että sähkönkulutus on sitä suurempaa mitä uudemmassa rakennuksesta on kyse. Esimerkiksi vuosina 1974 ja 2010 rakennettujen toimistorakennusten välillä oli 18,4 % ero sähkön käytössä. Tämän arvioitiin johtuvan uusien toimistojen korkeammasta työntekijätiheydestä sekä IT-laitteiden määrästä. Gao et al. (2019) tutkivat sähkönkulutusta asuinrakennuksissa ja päätyvät loogiseen tulokseen, että rakennuksen ominaiskulutus (kWh/m^2) laskee asunnon tai talon pinta-alan kasvaessa. Noorani et al. (2019) tutkivat rakennusten orientaation sekä ikkuna- ja seinäpinta-alojen suhteen vaikutusta asuintalon energiankulutukseen. Ikkuna- ja seinäpinta-alojen suhteen arvioitiin olevan merkittävämpi tekijä ja ideaaliseksi suhteeksi löydettiin 40 %. Silva & Sandanayake (2012) esittävät kirjallisuuskatsauksen rakennusten energiankulutusten mallintamiseen ja mallinnuksessa käytettyihin rakennusparametreihin. Mahdollisia energiankulutukseen vaikuttavia parametreja on kymmenittäin. Yleisimpinä mallinnuksessa käytettyinä rakennusparametreina mainittakoon esimerkiksi rakennuksen ikä, pinta-ala, kerrosten lukumäärä, orientaatio, muoto, huonekorkeus, ilmanvaihtojärjestelmä, ikkuna- ja seinäalojen suhde, katon ja seinien heijastavuus, varjostus sekä pohjan, seinien ja katon lämpöeristys. Näiden lisäksi kulutusta selittää myös monet asukkaisiin ja heidän käyttökseen liittyvät tekijät kuten asukasmäärä ja -tiheys, ikä, sosiaalinen luokka, kulttuuri ja henkilökohtaiset mieltymykset esimerkiksi sisälämpötilan suhteen.

Tässä tutkimuksessa ei ole käytettävissä kaikkia edellä mainituissa papereissa käytettyjä kulutukseen vaikuttavia tekijöitä, mutta melko moni tärkeäksi todettu tieto löytyy rakennustiedoista. Tiedossa on esimerkiksi rakennusten tilavuudet, pinta-alat, kerrosten lukumäärät, huoneistojen lukumäärät ja valmistumisvuodet. Tietoja asukasmäärästä tai asukkaiden sosioekonomisista taustoista ei ole saatavilla rakennuskohtaisesti avoimena datana. Tietoturvasyistä näitä tietoja on saatavissa avoimesti tarkimmillaankin vain 250x250 metrin ruututietoina. Sosioekonomisia tietoja ei siten ole voitu hyödyntää tässä tutkimuksessa.

Kun tarkasteltavat muuttujat ovat selvillä, niiden vaikutusta rakennusten sähkönkulutukseen voidaan mallintaa monella eri menetelmällä. Godoy-Shimizu et al. (2016) ja Signor et al. (2001) mallintavat sähkönkulutusta monimuuttujaregression avulla, kun taas Wei et al. (2015) käyttävät monta eri koneoppimismenetelmää: SVM (Support Vector Machine), MARS (Multivariate Adaptive Regression Splines), bagging MARS, RF (Random Forest) ja GP (Gaussian Process). MARS- ja RF-menetelmien todetaan olevan hyviä vuosittaisen lämmitysenergian mallintamisessa, kun taas GP- ja bagging MARS -menetelmien todetaan olevan tehokkaimpia jäähdytyskuormien ja sähkönkulutuksen mallintamisessa. Lisäksi eri muuttujien vaikutusta sähkönkulutukseen analysoitaessa voidaan käyttää tilastollisia menetelmiä ja testejä kuten on tehty lähteessä Godoy-Shimizu et al. (2016), jossa on käytetty ANOVA (Analysis of variance) -menetelmää määrittäessä, onko erikorkuisten rakennusten kulutuksessa tilastollisesti merkittäviä eroja ja Tukey HSD (Honest Significance Difference) -testiä määrittämään, missä korkeuksissa erot tapahtuvat.

Tässä tutkimuksessa käytetään vain verrattain yksinkertaista monimuuttujaregressiota sekä perustason tilastollisia analyyseja tutkimuksen kokeellisen luonteen takia. Tavoitteena on ensin selvittää, onko rakennustietojen käyttö erityyppisten rakennusten sähkönkulutuksen mallinnuksessa ylipäätään mahdollista ennen kuin siihen aletaan soveltamaan kehittyneempiä menetelmiä. Erityisesti MARS-menetelmä vaikutti tulevaisuudessa kokeilemisen arvoiselta. Perusidealtaan se on varsin yksinkertainen, siinä dataan sovitetaan useampi lineaarinen malli, jolloin epälineaarisesti (tai tarkemmin sanottuna eri alueilla eri tavalla lineaarisesti) käyttäytyvää dataa pystytään mallintamaan

tarkemmin. Perinteisesti tällaisia paloittaisia malleja on muodostettu käsin, mutta MARS-menetelmässä palojen lukumäärien ja yhdistymispisteiden määrittäminen tapahtuu automaattisesti koneoppimiseen nojaten. Valmiita Matlab-funktioita MARS-menetelmän käyttöön löytyy mm. ARESLab-työkalupaketista (Jekabsons 2016).

5) Vuosienergiankulutuksen mallintaminen

5.1. Lähtötiedot

Rakennustiedoista valittiin seuraavat 8 muuttujaa, joiden suhteen rakennusten sähkönkulutusta analysoidaan tässä tutkimuksessa:

- Tilavuus (m^3)
- Kokonaisala (m^2)
- Kerrosala (m^2)
- Asumisala (m^2)
- Kellariala (m^2)
- Kerroksien lkm
- Huoneistojen lkm
- Valmistumisvuosi

Useat muut rakennustiedot, esimerkiksi käyttötapa, lämmitystapa ja polttoaine on jo huomioitu tarkasteltavia rakennuksia ryhmiteltäessä, joten ne ovat vakioita kunkin ryhmän sisällä. Jotkin muut rakennustiedot, esimerkiksi rakennusaine ja hissien olemassaolo, ovat puolestaan joko luokallisia tai binaarisia tietoja ja siten heikosti regressioon yhteydessä hyödynnettäviä.

On selvää, että useat yllä luetellut rakennusparametrit korreloivat voimakkaasti keskenään eikä kaikkia näitä kannata valita regressiomalliin selittäjiksi. Selittävien muuttujien valinta on kuitenkin jätetty myöhäisempään vaiheeseen, jossa hyödynnetään Matlab-funktiota *stepwiselm*. Tämä funktio muodostaa (monimuuttujaregressiomallin lähtemällä liikkeelle vakiomallista ja lisäämällä siihen yksitellen, aina kussakin tilanteessa p-arvoltaan pienimpiä muuttujia, kunnes yksikään muuttuja ei alita asetettua p-arvorajaa tai asetettu muuttujien maksimimäärä saavutetaan. Funktio voi iteroinnin aikana myös poistaa aikaisemmin lisättyjä muuttujia, jos niiden p-arvo laskee alle raja-arvon. Lisäksi funktio voi muodostaa muuttujia yhdistelemällä tai potenssiin korottamalla uusia selittäviä muuttujia.

Vuosienergian kulutusta mallinnettaessa lähtötietona käytetään vaiheessa yksi määritettyjä käyttöpaikkojen lämpötilanormalisoituja vuosienergiaestimaatteja.

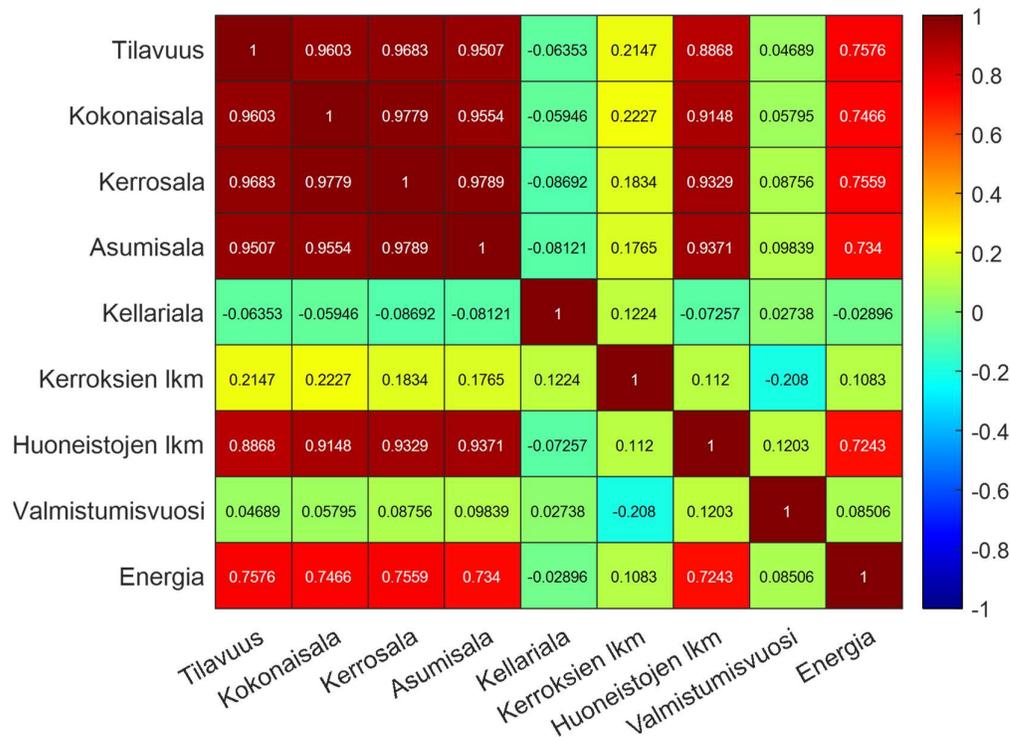
5.2. Korrelaatioanalyysi

Vuosienergioiden ja rakennustietojen analysointi aloitetaan tutkimalla yksittäisten muuttujien korrelaatiota vuosienergiaan. Taulukossa 5.1 on esitetty rakennustietojen korrelaatiot öljylämmitteisten kerrostalojen vuosienergiaan. Kerrostalon kokoa kuvaavilla muuttujilla on kaikilla hyvin suuri ja tilastollisesti merkittävä (pieni p-arvo) korrelaatio vuosienergiaan. Tässä tapauksessa ainoastaan kellarialalla ei ole merkittävää korrelaatiota vuosienergiaan. Lisäksi kellarialatieto puuttuu 82 prosentilta kerrostaloista ja tämän takia kellariala poistetaan kaikista tämän rakennusryhmän jatkoanalyysistä. Poiston raja-arvona käytetään tässä 30 prosenttia. Paljon puuttuvia arvoja sisältävien muuttujien mukana pitäminen pienentäisi liikaa tutkittavan otoksen kokoa.

Kuva 5.1 näyttää, miten tutkitut muuttujat korreloivat keskenään. Odotetusti tilavuus, pinta-alat ja huoneistojen lukumäärä korreloivat keskenään voimakkaasti.

Taulukko 5.1. Öljylämmitteisten kerrostalojen rakennustietojen korrelaatiot vuosienenergiaan.

| Rakennustieto | Korrelaatio vuosienenergiaan | p-arvo | Puuttuvien arvojen prosenttisuus |
|------------------|------------------------------|-------------|----------------------------------|
| Kerrosala | 0,944 | 5,315E-271 | 0 |
| Asumisala | 0,944 | 8,0223E-264 | 2 |
| Kokonaisala | 0,939 | 3,0794E-260 | 0 |
| Tilavuus | 0,935 | 2,5651E-253 | 0 |
| Huoneistojen lkm | 0,912 | 1,7764E-217 | 0 |
| Kerroksien lkm | 0,375 | 4,21424E-20 | 0 |
| Valmistumisvuosi | 0,191 | 5,58729E-06 | 0 |
| Kellariala | -0,054 | 0,596020522 | 82 |



Kuva 5.1. Öljylämmitteisten kerrostalojen rakennustietojen korrelaatiot toisiinsa.

5.3. Outliereiden suodatus

Jokaisesta rakennusryhmästä poistetaan kaikkein epäsäännöllisimmän käyttäytyvä 2 % outliereina. Poisto tehdään muodostamalla rakennusryhmän selitettävälle muuttujalle, tässä tapauksessa vuosienenergialle yhden muuttujan lineaarinen regressiomalli käyttäen selittäjänä muuttujana taulukossa 5.1 selitettyä suurimman korrelaation omaavaa rakennustietoa. Tästä mallista eniten poikkeava 2 % poistetaan outliereina. Kuvassa 5.2 on esimerkki rakennusryhmästä öljylämmitteiset kerrostalot poistetuista outliereista.

Kuva 5.2. Outliereiden suodatus rakennusryhmässä öljylämmitteiset kerrostalot. *Kuva poistettu julkisesta raportista.*

5.4. Ristiinvalidointi ja muuttujien lukumäärän valinta

Ylisovitteisten regressiomallien välttämiseksi tarkasteltava data jaetaan satunnaisesti kahteen yhtä suureen osaan, identifiointidataan ja verifiointidataan, ja rakennusryhmälle muodostetaan identifiointidataa ja Matlab-funktiota *stepwiselm* hyödyntäen yhtä monta regressiomallia kuin tarkasteltavia muuttujia on jäljellä. Ensimmäinen malli on silloin yhden muuttujan regressiomalli, toinen malli on kahden muuttujan regressiomalli ja niin edelleen kunnes viimeinen malli sisältää kaikki selittävät muuttujat. Kullakin mallilla mallinnetaan verifiointidatajoukon vuosienergioita ja mallinnusvirheistä lasketaan RMSE-arvo. Lisäksi tallennetaan kunkin mallin selitysaste (R^2) ja viimeisestä mallista saatavat kaikkien muuttujien p-arvot. Taulukko 5.2 esittää nämä tiedot öljylämmitteisille kerrostaloille.

Edellä mainittua laskentaa varten *stepwiselm*-funktio muuttujien lisäyksen ja poiston raja-arvot (*Penter* ja *Premove*) ”poistettiin käytöstä” asettamalla kummatkin lähelle lukua yksi. Malliin valittavien muuttujien lukumäärää säädettiin funktion askelten lukumäärällä (*Nsteps*) ja malli rajoitettiin sisältämään ainoastaan muuttujien lineaarikombinaatioita.

Taulukosta 5.2 nähdään, että tässä tapauksessa selittävien muuttujien lukumäärän lisääminen ei juurikaan kasvata selitysastetta. Kolmen selittävän muuttujan lisäämisen jälkeen neljännen muuttujan p-arvo on enää 0,076 ja koska tämä on yleisesti regression yhteydessä käytettävän raja-arvon 0,05 yläpuolella, ei neljättä muuttujaa enää lisätä malliin. Toisaalta verifikaatiodatalla laskettu RMSE-arvo saavuttaa miniminsä kolmen muuttujan kohdalla, tarkoittaen että tämän jälkeen malli alkaa olemaan ylisovitettu. Muuttujien maksimimäärä valitaan siis kahdella ehdolla, p-arvon tulee olla alle 0,05 ja RMSE-arvo ei saa kasvaa minimiarvostaan. Tässä tapauksessa lopulliseen regressiomalliin valitaan siis kolme selittävää muuttujaa: kokonaisala, huoneistojen lukumäärä ja asumisala. Useimmissa muissa rakennusryhmissä muuttujien lukumääräksi valikoitui kaksi tai joskus jopa vain yksi.

Taulukko 5.2 tulkittaessa tulee huomioida, että sen esittämät tulokset saattavat vaihdella hieman eri suorituskertojen välillä, riippuen siitä miten data tulee jaetuksi datan satunnaisjaossa identifiointi- ja verifiointiosiin. Mikäli selittävien muuttujien optimimäärä vaihteli eri suorituskertojen välillä, taulukkoon 5.2 valittiin keskimääräistä optimimäärää edustavan suorituskerran tulokset.

Taulukko 5.2. Selittävien muuttujien lukumäärän valinta öljylämmitteisille kerrostaloille.

| | Muuttujien lisäysjärjestys | Kumulatiivinen selitysaste R^2 identifioinnissa | p-arvo identifioinnissa | RMSE verifikaatiossa |
|----|----------------------------|---|-------------------------|----------------------|
| 1. | Kokonaisala | 0,920 | 0,000 | 22357,086 |
| 2. | Huoneistojen lkm | 0,927 | 0,000 | 22618,851 |
| 3. | Asumisala | 0,930 | 0,015 | 22033,915 |
| 4. | Tilavuus | 0,930 | 0,076 | 22302,699 |
| 5. | Valmistumisvuosi | 0,931 | 0,025 | 22039,637 |
| 6. | Kerrosala | 0,931 | 0,462 | 22196,073 |
| 7. | Kerroksien lkm | 0,931 | 0,848 | 22168,263 |

5.5. Lopullisen mallin muodostus

Lopullinen regressiomalli laskettiin stepwiselm-funktiolla koko rakennusryhmän dataa käyttäen ja asettaen selittävien muuttujien määräksi taulukon 5.2 perusteella määritetty optimilukumäärä. Lopulliset tulokset on koottu taulukkoon 5.3. Huomaa että taulukkoon 5.2 vaikuttaneen satunnaisuuden takia lopulliseen malliin valikoituneet muuttujat saattavat poiketa taulukossa 5.2 valituista muuttujista. Taulukossa 5.3 muuttujat eivät myöskään ole lisäsjärjestyksessä. Ensin malliin lisätään aina vakiotermi ja sitten yksitellen muuttujat, joiden lisäsjärjestyksen voi useimmiten päätellä p-arvoista. Taulukossa 5.3 esiintyvät p-arvot eivät kuitenkaan aina kerro muuttujien lisäsjärjestyksestä, sillä ne kertovat muuttujien p-arvot vain lopullisessa mallissa. Tässä tapauksessa kolmella muuttujalla saavutetaan erittäin hyvä selitysaste 0,912. Kuva 5.3 vertaa lopullisen regressiomallin ulostuloja mitattuihin vuosienergioihin.

Taulukko 5.3. Lopullinen regressiomalli öljylämmitteisten kerrostalojen vuosienergioille.

| | Estimaatti | SE | t-stat | p-arvo |
|----------------------------|-------------|------------|--------|----------|
| Vakiotermi | -684845,996 | 133501,444 | -5,130 | 4,05E-07 |
| Kerrosala | 29,196 | 1,617 | 18,052 | 2,53E-57 |
| Huoneistojen lkm | 441,248 | 111,482 | 3,958 | 8,57E-05 |
| Valmistumisvuosi | 351,830 | 68,250 | 5,155 | 3,57E-07 |
| | | | | |
| Selitysaste R ² | 0,912 | | | |
| RMSE | 21348 | | | |

Kuva 5.3. Lopullisen regressiomallin ulostulot verrattuna mitattuihin vuosienergioihin (öljylämmitteiset kerrostalot, piirretty selkeyden vuoksi vain yhden selittävän muuttujan funktiona).

Kuva poistettu julkisesta raportista.

5.6. Vuosienergiamallien yhteenveto

Taulukko 5.4 esittää yhteenvedon luvun 5 tuloksista. Taulukossa on esitetty kunkin rakennusryhmän regressiomalliin valitut rakennustiedot niiden lisäsjärjestyksessä, mallin selitysaste R², sekä mallin RMSE-arvon suhde rakennusryhmän keskimääräiseen vuosienergiaan. Viimeinen sarake kertoo, mikä olisi RMSE-arvon ja keskimääräisen vuosienergian suhde, jos rakennusten vuosienergiaa mallinnettisiin rakennusryhmän vuosienergioiden keskiarvolla. RMSE-arvot on tässä taulukossa jaettu keskimääräisellä vuosienergialla, jotta eri rakennusryhmien mallinnusvirheet ovat vertailukelpoisia.

Taulukosta 5.4 nähdään, että omakotitalojen regressiomallien selitysasteet ovat verrattain heikkoja. Regressiomallit eivät juurikaan paranna omakotitalojen vuosienergiaestimaatteja, kun malleja verrataan keskimääräisten vuosienergioiden käyttöön. Kuva 5.4 vertailee varaavaa sähkölämmitystä käyttävien omakotitalojen mitattuja vuosienergioita ja regressiomallilla estimoituja vuosienergioita. Nähdään, että malli pystyy selittämään vain murto-osan vuosienergioissa esiintyvistä vaihtelusta.

Lisäksi, kuten kuvasta 5.5 nähdään, regressiomalli yliarvioi vuosienenergialtaan pienten omakotitalojen vuosienenergiaa ja aliarvioi vuosienenergialtaan suurten omakotitalojen vuosienenergiaa.

Rivi- ja kerrostalojen regressiomalleilla sen sijaan on, maalämpöpumpullisia taloja lukuunottamatta, melko hyvät selityskertoimet. Rivitaloissa sähköenergiankulutusta selittää ensisijaisesti rakennuksen kokoon liittyvät rakennusparametrit ja muutamissa tapauksissa myös rakennuksen valmistumisvuosi. Aikaisemmin esitetty kuva 5.3 näytti esimerkin siitä, miten hyvin kerrostalojen vuosienenergioiden mallinnus onnistuu regressiomallilla. Kuvasta 5.6 nähdään vielä, että öljylämmitteisten kerrostalojen tapauksessa ennustevirheet ovat jakautuneet varsin tasaisesti.

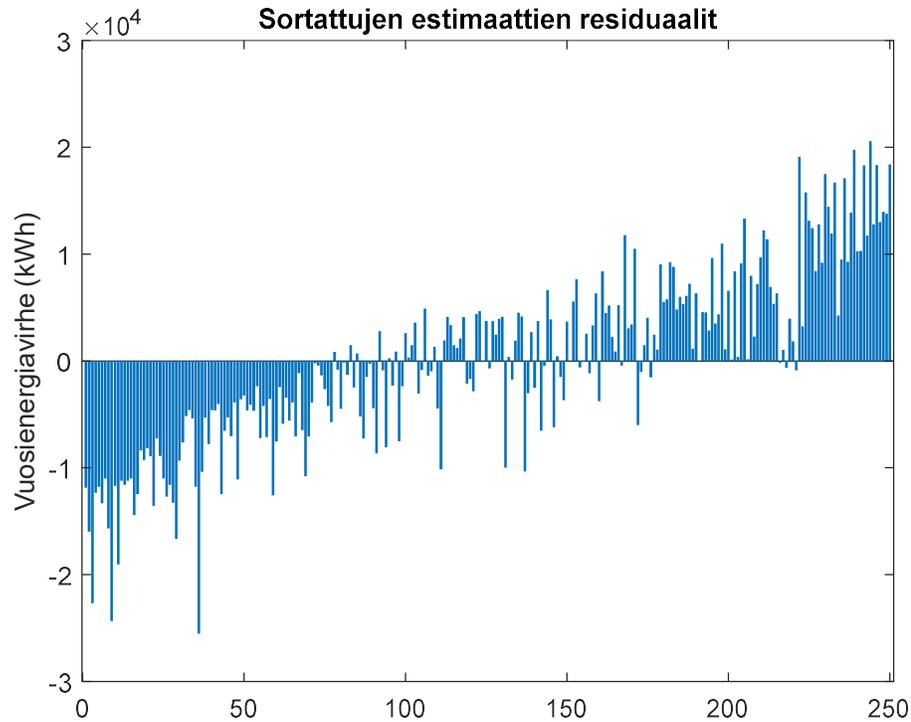
Myös kerrostaloissa ensimmäinen selittävä muuttuja on aina rakennuksen tilavuuteen tai pinta-alaan liittyvä, mutta sen jälkeen selittäjäksi nousevat rivitaloja selkeämmin valmistumisvuosi sekä huoneistojen lukumäärä. Muista rakennustyypeistä parhaiten pystytään mallintamaan toimistorakennusten ja koulujen sähköenergiankulutusta, kummassakin selitysaste $R^2 > 0,74$. Teollisuusrakennusten ja kauppojen selitysasteet jäivät selvästi pienemmiksi, ollen kuitenkin selvästi parempia kuin omakotitalojen selitysasteet.

Kuva 5.4. Omakotitalot varaavalla sähkölämmityksellä, lopullisen regressiomallin ulostulot verrattuna mitattuihin vuosienenergioihin (piirretty vain yhden selittävän muuttujan funktiona)

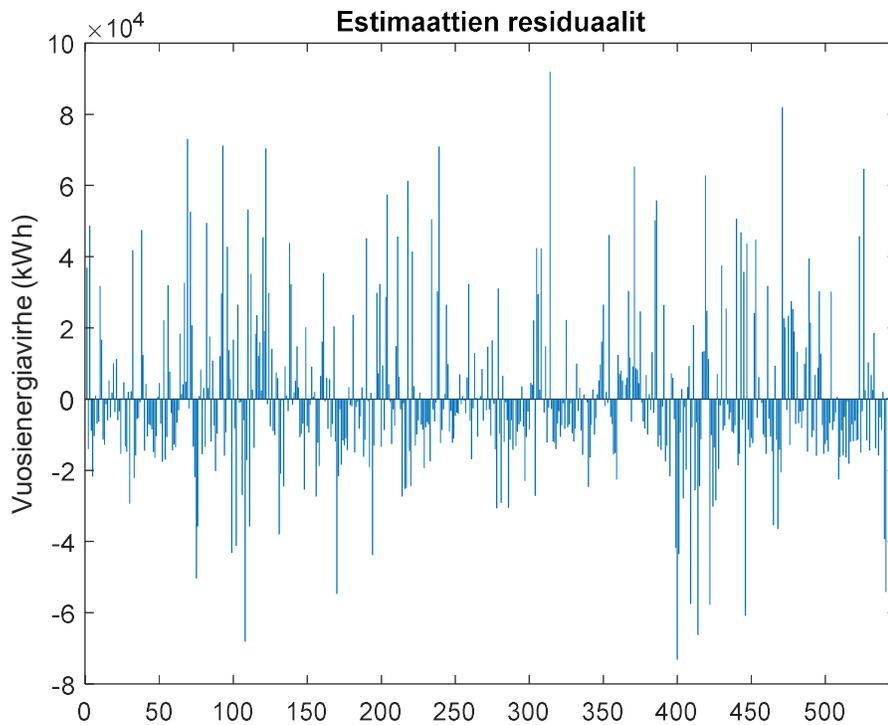
Kuva poistettu julkisesta raportista.

Taulukko 5.4 sisältää yhteenvedon kaikkien rakennusryhmien vuosienenergioiden regressiomalleista.

| | 1. muuttuja | 2. muuttuja | 3. muuttuja | R ² | RMSE/E _{keskiarvo} (regressiomalli) | RMSE/E _{keskiarvo} (vakiomalli) |
|------------------------------|-------------|------------------|------------------|----------------|---|---|
| Omakotitalot | | | | | | |
| Suora sähkölämmitys | Kokonaisala | Tilavuus | - | 0,146 | 0,361 | 0,395 |
| Suora sähköl.+käyttövesi | Tilavuus | Kerroksien lkm | Kokonaisala | 0,355 | 0,228 | 0,286 |
| Varaava sähkölämmitys | Tilavuus | Valmistumisvuosi | - | 0,248 | 0,284 | 0,330 |
| Kaukolämpö | Tilavuus | Asumisala | Kerrosala | 0,176 | 0,414 | 0,462 |
| Kevyt polttoöljy | Kokonaisala | Tilavuus | - | 0,082 | 0,618 | 0,652 |
| Maalämpöpumppu | Kokonaisala | Valmistumisvuosi | Tilavuus | 0,244 | 0,296 | 0,344 |
| Rivitalot | | | | | | |
| Suora sähkölämmitys | Kokonaisala | Asumisala | - | 0,830 | 0,247 | 0,629 |
| Suora sähköl.+käyttövesi | Kokonaisala | Asumisala | Valmistumisvuosi | 0,922 | 0,157 | 0,593 |
| Varaava sähkölämmitys | Tilavuus | - | - | 0,670 | 0,282 | 0,521 |
| Kaukolämpö | Asumisala | Tilavuus | Valmistumisvuosi | 0,843 | 0,321 | 0,870 |
| Kevyt polttoöljy | Kerrosala | Tilavuus | - | 0,590 | 0,454 | 0,746 |
| Maalämpöpumppu | Asumisala | Kokonaisala | - | 0,296 | 0,389 | 0,496 |
| Kerrostalot | | | | | | |
| Kaukolämpö | Tilavuus | Valmistumisvuosi | Huoneistojen lkm | 0,833 | 0,274 | 0,757 |
| Öljylämmitys | Kerrosala | Valmistumisvuosi | Huoneistojen lkm | 0,912 | 0,257 | 1,014 |
| Maalämpöpumppu | Tilavuus | Valmistumisvuosi | - | 0,650 | 0,375 | 0,909 |
| Toimistot | | | | | | |
| Kaukolämpö | Tilavuus | - | - | 0,767 | 0,390 | 0,802 |
| Kaupat | | | | | | |
| Kaukolämpö tai öljylämmitys | Kokonaisala | Kerrosten lkm | - | 0,409 | 0,683 | 1,029 |
| Koulut | | | | | | |
| Kaukolämpö | Kerrosala | - | - | 0,746 | 0,288 | 0,594 |
| Teollisuusrakennukset | | | | | | |
| Kaukolämpö tai öljylämmitys | Tilavuus | - | - | 0,518 | 0,770 | 1,367 |



Kuva 5.5. Omakotitalot varaavalla sähkölämmityksellä, vuosienenergiamallin residuaalit (sortattu todellisen vuosienenergian mukaan pienimmästä suurimpaan).



Kuva 5.6. Kerrostalot öljylämmityksellä, vuosienenergiamallin residuaalit (sortattu todellisen vuosienenergian mukaan pienimmästä suurimpaan).

6) Huipputehon mallintaminen

Vuoden suurinta yksittäistä tuntitehoa (huipputeho) mallinnettaessa tulokset olivat hyvin samankaltaisia kuin vuosittaista energiankulutusta mallinnettaessa. Omakotitalot olivat vaikeasti mallinnettavia, kun taas usean asunnon rivi- ja kerrostalojen huipputehoja pystyttiin mallintamaan verrattain hyvin. Kuten vuosienenergiaa mallinnettaessa, myös huipputehoja mallinnettaessa rakennuksen kokoa kuvaavat rakennustiedot olivat ensimmäisiä regressiomalliin valittavia selittäviä muuttujia. Yhteenveto tuloksista on nähtävillä taulukossa 6.1.

7) Kulutusprofiilin mallintaminen

7.1. Kuormitusprofiilien laskenta ja mallinnus

Vuosienenergioiden ja huipputehojen lisäksi tavoitteena oli selvittää, onko kulutusprofiilien muodon mallintaminen mahdollista. Tätä varten jokaisen rakennusryhmän jokaiselle rakennukselle lasketaan lämpötilan ja vuosienenergian suhteen normalisoidut kuormitusprofiilit. Kullekin rakennusryhmälle laskettuja lämpötilariippuvuuskerroimia käytettiin normalisoitaessa kulutusprofiilit Helsingin pitkän aikavälin (30 vuotta) keskilämpötiloihin. Kaikkien rakennusten kuormitusprofiilit normalisoitiin samaan 10 MWh vuosienenergiaan. Normalisoitujen kuormitusprofiilien laskennassa hyödynnettiin mittausdataa kaikilta käytettävissä olleilta kolmelta vuodelta (2016–2018) ja kuormitusprofiilit laadittiin vuoden 2018 kalenteria vastaavaksi. Laskettujen kuormitusprofiilien kukin yksittäinen tunti on 31 päivän liukuvalla ikkunalla laskettu keskiarvo kaikkien tunnin ja viikonpäivän osalta vastaavien tuntien tehoista kaikkina kolmena vuotena.

Heti taulukon 7.1 korrelaatioita tarkasteltaessa tulee selväksi, että tuntitasoisen kulutukselle ei pystytä tekemään yhtä hyviä malleja kuin vuosienenergioille ja huipputehoille. Myös selittävien muuttujien valinta on vaikeampaa, koska parhaiten kunkin tunnin sähkökulutusta selittävät muuttujat vaihtelevat vuodenajoinnain sekä tunneittain. Kuva 7.1 näyttää, kuinka kesäkuukausina valmistumisvuosi ja kerrostalon lukumäärä korreloivat parhaiten varaavalla sähkölämmityksellä varustettujen rivitalojen tuntienenergioiden kanssa, mutta talvikuukausina korrelaatiot ovat suurempia muun muassa huoneistojen lukumäärällä. Olisi mahdollista valita, vaikka vuoden jokaiselle tunnille eri selittävät muuttujat, mutta mallin yksinkertaistamiseksi tässä tutkimuksessa on päätetty käyttää kahta (joissain tapauksissa kolmea) kaikille tunneille yhteistä selittävää muuttujaa.

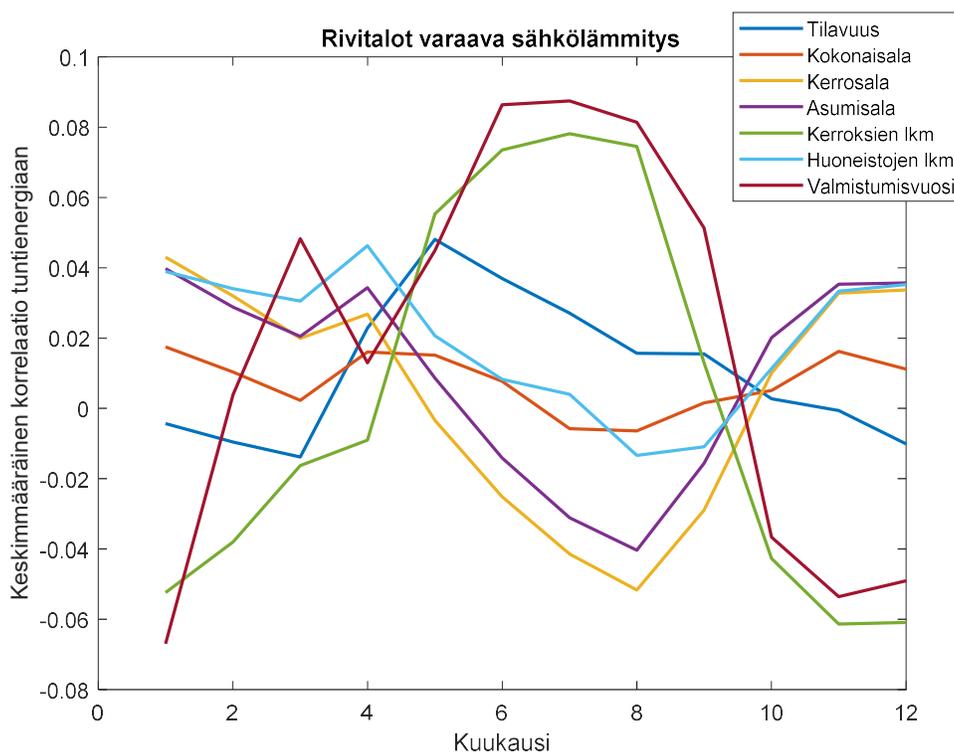
Selittävät muuttujat valitaan siten, että ensin lasketaan vuoden jokaiselle tunnille regressiomalli käyttäen Matlabin *stepwiselm*-funktiota ja kaikkia selittäviä muuttujia. Jokaiselta tunnilta valitaan kaksi ensimmäistä malliin lisättyä muuttujaa ja näistä lasketaan prosenttiosuudet, joilla kukin yksittäinen muuttuja on kahden tärkeimmän muuttujan joukossa. Taulukossa 7.2 kahdella ensimmäisellä rivillä olevat muuttujat tulevat valituksi rakennusryhmäkohtaiseen tuntienenergioiden regressiomalliin. Normalisoidun kuormitusprofiilin regressiomalli koostuu siis 8760 erillisestä regressiomallista, joissa kaikissa on samat selittävät muuttujat. Yksittäisen rakennuksen lopullinen kuormitusprofiilistimaatti saadaan, kun tämä normalisoitu profiili skaalataan vastaamaan rakennuksen luvussa 5 laskettua vuosienenergiaestimaattia. Lopulliseen kuormitusprofiiliin vaikuttavat siis paitsi tässä valitut kaksi selittävää muuttujaa, niin myös muuttujat, jotka selittävät rakennuksen vuosittaista sähköenergian kulutusta.

Taulukko 6.1 Yhteenveto kaikkien rakennusryhmien huipputehojen regressiomalleista.

| | 1. muuttuja | 2. muuttuja | 3. muuttuja | R ² | RMSE/P _{max,ka} (regressiomalli) | RMSE/P _{max,ka} (vakiomalli) |
|------------------------------|-------------|------------------|------------------|----------------|--|--|
| Omakotitalot | | | | | | |
| Suora sähkölämmitys | Kokonaisala | Asumisala | - | 0,211 | 0,253 | 0,285 |
| Suora sähköl.+käyttövesi | Tilavuus | Kerroksien lkm | Kerrosala | 0,313 | 0,196 | 0,236 |
| Varaava sähkölämmitys | Tilavuus | Valmistumisvuosi | - | 0,171 | 0,280 | 0,308 |
| Kaukolämpö | Tilavuus | Valmistumisvuosi | - | 0,170 | 0,302 | 0,331 |
| Kevyt polttoöljy | Kokonaisala | Valmistumisvuosi | - | 0,082 | 0,451 | 0,469 |
| Maalämpöpumppu | Tilavuus | - | - | 0,152 | 0,251 | 0,272 |
| Rivitalot | | | | | | |
| Suora sähkölämmitys | Asumisala | Kokonaisala | - | 0,846 | 0,215 | 0,544 |
| Suora sähköl.+käyttövesi | Kokonaisala | Huoneistojen lkm | Tilavuus | 0,923 | 0,153 | 0,547 |
| Varaava sähkölämmitys | Tilavuus | - | - | 0,364 | 0,442 | 0,552 |
| Kaukolämpö | Asumisala | Tilavuus | Valmistumisvuosi | 0,833 | 0,252 | 0,613 |
| Kevyt polttoöljy | Tilavuus | Kerrosala | - | 0,498 | 0,335 | 0,471 |
| Maalämpöpumppu | Tilavuus | Kokonaisala | - | 0,392 | 0,446 | 0,573 |
| Kerrostalot | | | | | | |
| Kaukolämpö | Tilavuus | Valmistumisvuosi | Kerrosala | 0,854 | 0,221 | 0,574 |
| Öljylämmitys | Kerrosala | Valmistumisvuosi | Asumisala | 0,875 | 0,232 | 0,673 |
| Maalämpöpumppu | Tilavuus | Valmistumisvuosi | - | 0,810 | 0,383 | 0,826 |
| Toimistot | | | | | | |
| Kaukolämpö | Tilavuus | - | - | 0,811 | 0,306 | 0,701 |
| Kaupat | | | | | | |
| Kaukolämpö tai öljylämmitys | Kokonaisala | Kerroksien lkm | - | 0,541 | 0,600 | 0,866 |
| Koulut | | | | | | |
| Kaukolämpö | Kerrosala | Valmistumisvuosi | - | 0,817 | 0,200 | 0,476 |
| Teollisuusrakennukset | | | | | | |
| Kaukolämpö tai öljylämmitys | Tilavuus | - | - | 0,595 | 0,659 | 1,030 |

Taulukko 7.1. Rivitalot varaavalla sähkölämmityksellä, yksittäisten rakennustietojen korrelaatioiden itseisarvojen keskimääräiset korrelaation normalisoitujen kulutusprofiilien tuntitehoihin.

| Rakennustieto | Keskim. korr. suuruus tuntitehoihin | keskim. p-arvo |
|------------------|-------------------------------------|----------------|
| Huoneistojen lkm | 0,093 | 0,373 |
| Kerroksien lkm | 0,077 | 0,474 |
| Valmistumisvuosi | 0,076 | 0,469 |
| Asumisala | 0,053 | 0,587 |
| Kerrosala | 0,048 | 0,621 |
| Tilavuus | 0,037 | 0,706 |
| Kokonaisala | 0,036 | 0,717 |



Kuva 7.1. Keskimääräiset korrelaatiot tuntienenergiaan, rivitalot varaavalla sähkölämmityksellä.

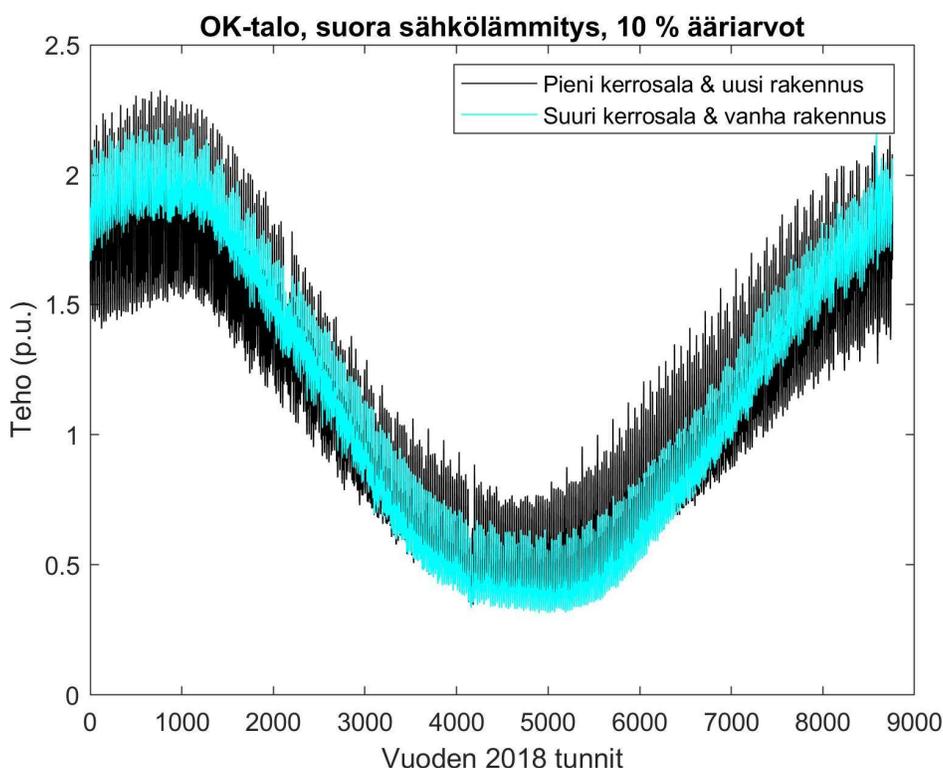
Taulukko 7.2. Rivitalot varaavalla sähkölämmityksellä, tuntitehoa selittävien muuttujien valinta.

| | Tärkeimmät muuttujat (Tuntitehot) | Todennäköisyys (%), jolla 2 tärkeimmän joukossa |
|----|-----------------------------------|---|
| 1. | Huoneistojen lkm | 27 |
| 2. | Valmistumisvuosi | 23 |
| 3. | Tilavuus | 16 |
| 4. | Kerroksien lkm | 14 |
| 5. | Kerrosala | 13 |
| 6. | Asumisala | 5 |
| 7. | Kokonaisala | 2 |

Taulukko 7.3 sisältää yhteenvedon kuormitusprofiilien regressiomalleista ja siitä nähdään, että mallien keskimääräiset selitysasteet ovat järjestään hyvin alhaisia. Rakennustiedot pystyvät selittämään vain murto-osan profiilien tunneittaisesta vaihtelusta. Suurin osa vaihtelusta jää rakennusten sähkökäyttäjien satunnaisen käyttäytymisen kontolle. Lukuihin 5 ja 6 verrattuna profiilin muotoa selittäviksi muuttujiksi on valikoitunut monipuolisempi joukko rakennustietoja. Varsinkin rakennuksen valmistumisvuosi vaikuttaa nousevan muita rakennustietoja useammin esille.

7.2. Kuormitusprofiilimallinnuksen tuloksia

Vaikka kuormitusprofiilin yksittäisten tuntien regressiomalleilla oli hyvin pienet selitysasteet ja pelkkään vakiomalliin verratut parannukset RMSE-arvoissa olivat vaatimattomia, voidaan kuormitusprofiilimalleilla kuitenkin sanoa olevan pieni, mutta selvä, profiilien mallinnustarkkuutta parantava vaikutus. Tämä tulee esille erityisesti tarkasteltaessa rakennusryhmien sisäisiä ääripäitä. Kuvassa 7.2 on esitetty pienimmän ja suurimman 10 % ääripäät suoralla sähkölämmityksellä varustetuille omakotitaloille. Musta käyrä esittää regressiomallin ulostulon kerrosalaltaan pienelle ja iältään uudelle omakotalolle ja sininen käyrä esittää mallin antaman vuosittaisen kuormitusprofiilin kerrosalaltaan suurelle ja iältään vanhalle omakotalolle. Edellämainitulla mustalla käyrällä on selvästi suurempi vuorokauden sisäinen vaihtelu (esim. yö- ja päiväkulutusten ero). Tämä tulos on siltä osin looginen, että pienissä ja energiatehokkaissa taloissa sähkölaitteiden käyttö, joka siis on vuorokaudenajasta riippuvaa, muodostaa suhteellisesti suuremman osan kokonaissähkökäytöstä kuin suurissa ja ei-energiatehokkaissa taloissa, joissa kuluu enemmän tasaista lämmityssähköä. Huomaa, että kuvassa on mallinnettu ainoastaan vuosittaisen kuormitusprofiilin *käyrämuotoa*. Tasoerot näiden erilaisten talojen kulutuksissa mallinnetaan luvussa 5 esitellyillä vuosienenergiamalleilla.

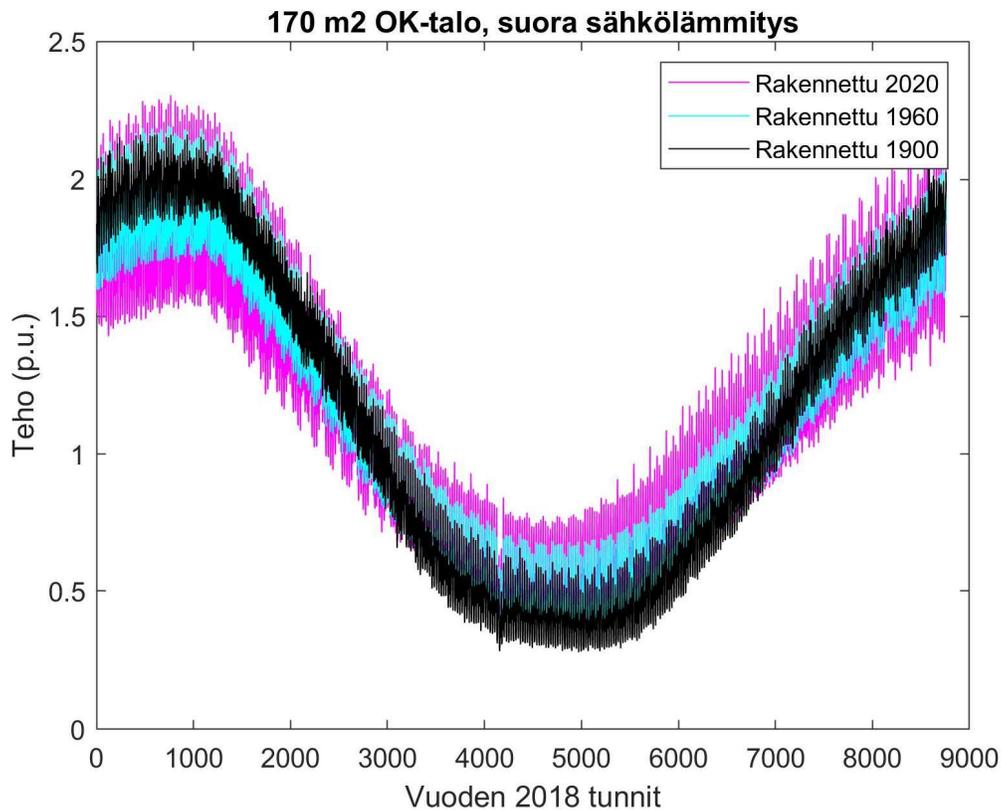


Kuva 7.2. Kerrosalan ja valmistumisvuoden vaikutus sähkölämmitteisen omakotalon kuormitusprofiilin muotoon.

Taulukko 7.3. Yhteenvedo kuormitusprofiilien mallinnuksesta, kolme viimeistä saraketta sisältävät kaikkien vuoden tuntien (8760) yli lasketut keskiarvot.

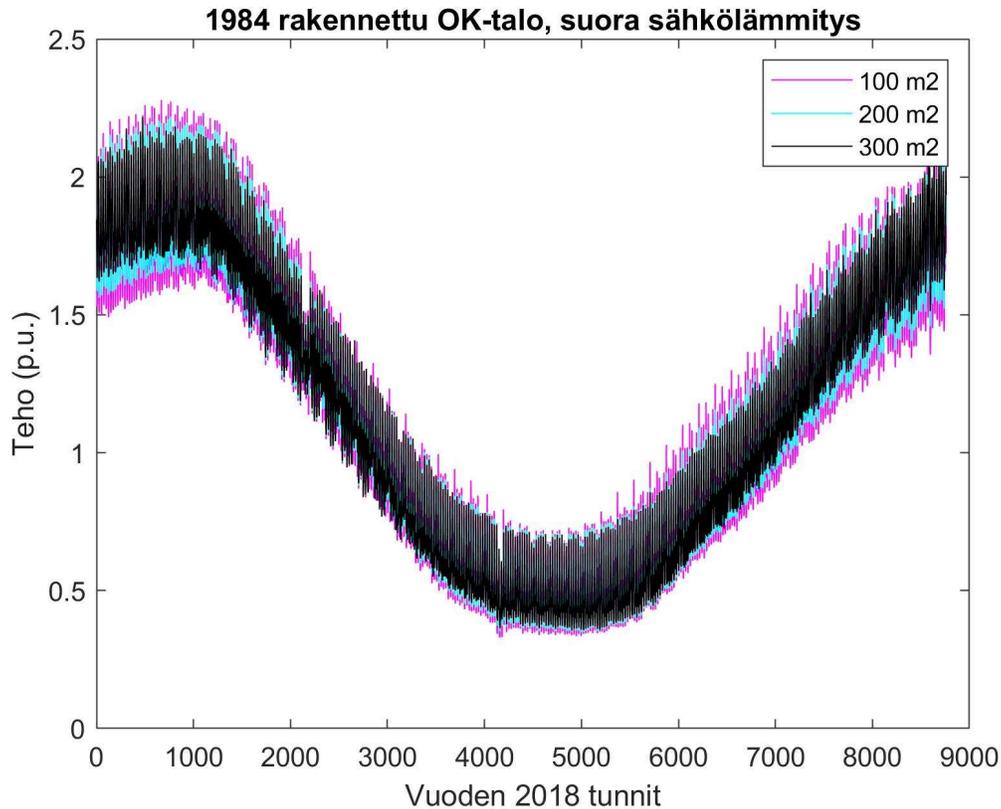
| | 1. muuttuja | 2. muuttuja | 3. muuttuja | ave(R ²) | ave(RMSE) (regressiomallit) | ave(RMSE) (vakiomalli) |
|------------------------------|------------------|------------------|------------------|----------------------|--------------------------------|---------------------------|
| Omakotitalot | | | | | | |
| Suora sähkölämmitys | Kerrosala | Valmistumisvuosi | - | 0,019 | 0,261 | 0,300 |
| Suora sähköl.+käyttövesi | Kerrosala | Valmistumisvuosi | Kerroksien lkm | 0,014 | 0,238 | 0,261 |
| Varaava sähkölämmitys | Valmistumisvuosi | Kokonaisala | - | 0,041 | 0,580 | 0,647 |
| Kaukolämpö | Valmistumisvuosi | Kerrosala | - | 0,014 | 0,322 | 0,393 |
| Kevyt polttoöljy | Kerroksien lkm | Kokonaisala | - | 0,006 | 0,341 | 0,422 |
| Maalämpöpumppu | Kerrosala | Valmistumisvuosi | - | 0,053 | 0,254 | 0,303 |
| Rivitalot | | | | | | |
| Suora sähkölämmitys | Valmistumisvuosi | Kerroksien lkm | - | 0,021 | 0,184 | 0,208 |
| Suora sähköl.+käyttövesi | Valmistumisvuosi | Kerroksien lkm | - | 0,031 | 0,163 | 0,201 |
| Varaava sähkölämmitys | Huoneistojen lkm | Valmistumisvuosi | - | 0,027 | 0,344 | 0,396 |
| Kaukolämpö | Valmistumisvuosi | Kerroksien lkm | - | 0,020 | 0,209 | 0,277 |
| Kevyt polttoöljy | Huoneistojen lkm | Valmistumisvuosi | - | 0,008 | 0,244 | 0,329 |
| Maalämpöpumppu | Kokonaisala | Valmistumisvuosi | - | 0,088 | 0,277 | 0,360 |
| Kerrostalot | | | | | | |
| Kaukolämpö | Kerrosala | Huoneistojen lkm | Kerroksien lkm | 0,057 | 0,164 | 0,197 |
| Öljylämmitys | Valmistumisvuosi | Kerroksien lkm | Huoneistojen lkm | 0,060 | 0,185 | 0,231 |
| Maalämpöpumppu | Valmistumisvuosi | Huoneistojen lkm | - | 0,154 | 0,190 | 0,228 |
| Toimistot | | | | | | |
| Kaukolämpö | Kerroksien lkm | Valmistumisvuosi | - | 0,059 | 0,183 | 0,204 |
| Kaupat | | | | | | |
| Kaukolämpö tai öljylämmitys | Valmistumisvuosi | Tilavuus | - | 0,102 | 0,240 | 0,432 |
| Koulut | | | | | | |
| Kaukolämpö | Huoneistojen lkm | Valmistumisvuosi | - | 0,078 | 0,221 | 0,261 |
| Teollisuusrakennukset | | | | | | |
| Kaukolämpö tai öljylämmitys | Kokonaisala | Kerroksien lkm | - | 0,068 | 0,347 | 0,413 |

Kuvassa 7.3 on tarkasteltu vain yhden muuttujan, tässä tapauksessa valmistumisvuoden vaikutusta omakotitalon kuormitusprofiiliin muotoon. Jälleen kerran nähdään selviä eroja ääripäiden välillä. Paitsi vuorokauden sisäisessä, niin myös kulutuksen vuodenaikavaihtelussa nähdään eroja. Vanhoilla taloilla on suurempi ero kesä- ja talviajan kulutuksissa kuin uudemmilla taloilla. Tämä on jälleen loogista seurausta uudempien talojen paremmasta lämmöneristävyystä. Vaikka erot ääripäidenkään välillä eivät ole suuria, tarjoaa kuormitusprofiilin regressiomalli kuitenkin mahdollisuuden parantaa asiakkaille esitettävien vertailukäyrien tarkkuutta, yksilöimällä vertailukäyrät juuri asiakkaan rakennustietojen mukaisiksi.



Kuva 7.3. Valmistumisvuoden vaikutus keskikokoisen (170 m²) sähkölämmitteisen omakotitalon kuormitusprofiiliin muotoon.

Kuvassa 7.4 on tarkasteltu vielä kerrosalan suuruuden vaikutusta omakotitalon kuormitusprofiiliin. Silmämääräisesti näyttää siltä, että kerrosalalla ei ole yhtä suurta vaikutusta kuin valmistumisvuodella, vaikka kerrosala on taulukossa 7.3 merkitty useimmiten kahden parhaan selittäjän joukkoon valituksi muuttujaksi. Järjestys, jossa muuttujat lisätään regressiomalliin ei välttämättä kerro, kuinka suuri on muuttujien merkitys lopullisessa mallissa. Siksi eniten kunkin regressiomallin ulostuloon vaikuttavia muuttujia kannattaisi analysoida vielä mahdollisissa jatkotutkimuksissa.



Kuva 7.4. Kerrosalan vaikutus keski-ikäisen (1984) sähkölämmitteisen omakotitalon kuormitusprofiilin muotoon.

8) Huomioita regressiomalleista

Tässä tutkimuksessa laskettujen regressiomallien leikkauspisteitä ei rajoitettu millään tavalla. Tästä seuraa, että jotkin mallit saattavat antaa erittäin pienille rakennuksille negatiivisia vuosienenergia- tai huipputehoarvioita, vaikka näiden arvojen ei pitäisi mennä negatiivisiksi. Esimerkiksi kaukolämmitteisten koulurakennusten vuosienenergiamalli antaa negatiivisia arvoja, jos koulurakennuksen kerrosala on pienempi kuin 514 m². Yhtään näin pientä koulua ei ollut tutkimusaineistossa, mutta tämä teoreettinen mahdollisuus on hyvä pitää mielessä malleja käytettäessä. Regressiomallien leikkauspisteet (intercept) olisi voitu pakottaa nolleen, jolloin tätä negatiivisuusongelmaa ei olisi, mutta silloin mallin tarkkuus normaalikokoisia rakennuksia mallinnettaessa olisi hieman kärsinyt.

9) Yhteenveto

Tässä tutkimuksessa rakennukset ryhmiteltiin käyttö- ja lämmitystavan mukaan 19 eri ryhmään ja näiden rakennusten kuormitusmalleja pyrittiin parantamaan rakennustietoja hyödyntämällä. Usean huoneiston rakennuksille saatiin muodostettua varsin hyvät vuosienenergia- ja huipputehomallit, mutta vastaavat omakotitalojen mallit jäivät selitysasteiltaan selvästi heikommiksi. Myös suurten sähkönkuluttajien kuten toimistojen, kauppojen, koulujen ja teollisuusrakennusten vuosienenergia- ja huipputehoja pystyttiin mallintamaan kohtuullisella tarkkuudella.

Tutkimuksessa käytettiin useimmiten kahden tai kolmen muuttujan monimuuttujaregressiota, ja joissain tapauksissa myös yksinkertaisen lineaarisen regression katsottiin olevan riittävä. Selittävien muuttujien lukumäärä pidettiin tarkoituksella pienenä, että malleista ei tule liian monimutkaisia tai ylisovitettuja. Jatkossa tämän tutkimuksen päälle voi rakentaa ottamalla käyttöön kehittyneempiä mallinnusmenetelmiä. Myös regressiomallien ulostuloihin vaikuttavia muuttujien tärkeysjärjestystä kannattaisi analysoida vielä jatkotutkimuksissa. Tässä ei ehditty saamaan täyttä varmuutta siihen, mitkä muuttujat ovat kussakin mallissa lopulta ne kaikkein eniten mallin ulostuloon vaikuttavat. Tutkimuksessa käytettyä aineistoa voisi käyttää myös tutkittaessa, miten eri lämmitysmuodot vaikuttavat sähkönkulutukseen.

Kuormitusprofiilien käyrämuotoja tutkittaessa löydettiin profiilien ja rakennustietojen väliltä vain hyvin heikkoja korrelaatioita ja mallien selitysasteet jäivät erittäin pieniksi. Ääripäitä tarkasteltaessa, rakennusparametreilla todettiin silti olevan selvästi nähtäviä vaikutuksia kuormitusprofiilien muotoihin. On kuitenkin syytä harkita tarkkaan, onko kuormitusprofiilien keskiarvomalleja monimutkaisemmista regressiomalleista riittävästi hyötyä esimerkiksi vertailukäyriä muodostettaessa. Vertailtaessa yksittäisen rakennuksen sähkönkulutusta keskimääräiseen vastaavan rakennuksen kulutukseen, suurin vertailua hankaloittava tekijä voi olla yksittäisen rakennuksen kulutuksen satunnaisuus, ei niinkään vertailumallin tarkkuus. Satunnaisuuden vaikutusta voisi jatkotutkimuksissa pienentää tarkastelemalla vuosiprofiilien sijaan esimerkiksi (arki)päivien profiileja ja rakennusparametrien vaikutuksia niihin.

Lähteet

Gao, J., Zhong, X., Cai, W., Ren, H., Huo, T., Wang, X. & Mi, Z. (2019) "Dilution Effect of the Building Area on Energy Intensity in Urban Residential Buildings", *Nature Communications*, <https://doi.org/10.1038/s41467-019-12852-9>.

Godoy-Shimizu, D., Steadman, P., Hamilton, I., Donn, M., Evans, S., Moreno, G. & Shayesteh, H. (2018) "Energy use and height of office buildings", *Building Research & Information*, Vol. 46, No. 8.

Jekabsons, G. 2016 "ARESLab: Adaptive Regression Splines toolbox for Matlab/Octave", available at: <http://www.cs.rtu.lv/jekabsons/>

Noorani, K., Marzbali, M.H., Tilaki, M.J.M. & Abdullah, A. (2019) "Assessing the Impact of Building Parameters on Energy Performance in Residential Settings", 4th International Conference on Rebuilding Place, Penang, Malaysia.

Signor, R., Westphal, F.S. & Lamberts, R. (2001) "Regression Analysis of Electric Energy Consumption and Architectural Variables of Conditioned Commercial Buildings in 14 Brazilian Cities", 7th International IBPSA Conference, Rio de Janeiro, Brazil.

Silva, M.N.K. & Sandanayake Y.G. (2012) "Building Energy Consumption Factors: A Literature Review and Future Research Agenda", World Construction Conference, Colombo, Sri Lanka.

Wei, L., Tian, W., Zuo, J., Yang, Z-Y., Liu, Y. & Yang, S. (2015) "Effect of Building Form on Energy use for Building in Cold Climate Regions" 8th International Cold Climate HVAC Conference (CCHVAC), Dalian, China.

Yohanis, Y.G., Mondol, J.D., Wright, A. & Norton B. (2008) "Real-life energy use in the UK: How occupancy and dwelling characteristics affect domestic electricity use", *Energy and Buildings*, Vol. 40.