

Opinnäytetyö AMK

Ajoneuvo- ja kuljetustekniikka

Autotekniikka

2017

Kalle Koivisto

SÄHKÖBUSSIN MALLINNUS GT-SUITE -SIMULAATIO- OHJELMALLA

OPINNÄYTETYÖ AMK | TIIVISTELMÄ

TURUN AMMATTIKORKEAKOULU

Ajoneuvo- ja kuljetustekniikka

2017 | sivumäärä 35 + liitteet

Kalle Koivisto

SÄHKÖBUSSIN MALLINNUS GT-SUITE -SIMULATIO-OHJELMALLA

Opinnäytetyön tarkoituksena on tutkia Turussa linjalla 1 käytettävien sähköisten linja-autojen energiankulutusta Turun ammattikorkeakoululle uuden GT-Suite -ohjelmiston avulla. Tarkoituksena on myös selvittää käyttäjäpohjaisesti ohjelmiston soveltuvuutta tutkimus- ja opetuskäyttöön. Mallinnuksen tuottamia tuloksia verrataan Turun AMK:ssa aiemmin manuaalisesti laskettuihin tuloksiin sekä tehtaan antamiin arvoihin. Näiden yhteneväisyyden perusteella arvioidaan ohjelman käyttökelpoisuutta.

Opinnäytetyö on osa Turun kaupungin toimeksiantoa Turun ammattikorkeakoululle. Toimeksannon tarkoituksena on olla teknisenä tukena sekä tutkia ja seurata linjan toimintaa. Havainnot ja tulokset raportoidaan sekä Turun kaupungille että linja-autojen toimittajalle Linkker Oy:lle.

Työn edetessä havaittiin ohjelman vaativan syventymistä mallin rakentamiseen ja jatkuvaa mallin toiminnan tarkkailua. Keskeneneräisellä mallilla oli hyvä suorittaa muutosten jälkeen välilaskentaa ja varmistaa mallin toimivuus. Ilman tällaista tarkkailua laskenta keskeytyy ennen aikojaan ja ohjelma antaa virheilmoituksia. Laajojen muutosten jälkeen tulevien mallinnusvirheiden korjaus on työlästä ja sitä tulee välttää.

Ohjelma sisältää valtavan sähköisen ohjekirjan, josta löytyy apu lähes kaikkiin ongelmiin. Ohjekirjan antaman vastauksen ollessa puutteellinen on mahdollista ottaa yhteyttä tekniseen tukeen, joka työn ohessa käytyjen sähköpostikeskustelujen perusteella vastaa sille kohtuullisena pidettävässä ajassa.

Itse malli saatiin toimimaan halutulla tavalla. Saadut tulokset vastasivat lähtötietoihin nähden hyvin todellisuutta. Lopputulokseksi saavutettiin 11 %:n ero aikaisemmin laskettuihin vertailutuloksiin nähden, mikä osoittaa, että molempien laskentatapojen suuruusluokka on oikea.

ASIASANAT:

Simulaatio, Mallinnus, Sähkölinja-auto, Energiankulutus

BACHELOR'S THESIS THESIS | ABSTRACT

TURKU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Automotive and Transportation Engineering

2017 | Total number of pages 35 + appendixes

Kalle Koivisto

CREATING A MODEL OF AN ELECTRIC BUS WITH THE GT-SUITE SIMULATION PROGRAM

The aim of this bachelor's thesis is to research energy consumption of electric buses on Turku bus route 1 using GT-Suite vehicle simulation software. Another goal is to report the program's suitability for further research and teaching purposes from the user's point of view. The results are compared to results generated previously in Turku UAS by manual calculation methods. The results are also compared to information received from the bus manufacturer.

This bachelor's thesis is a part of a commission given to Turku UAS by the city of Turku. The purpose of this commission is to research and monitor the function of these new electric buses. The observations and results are reported to the bus manufacturer Linkker Oy and the city of Turku.

As the research proceeded, it was noted that the use of the program requires deep understanding of creating the model and that it is necessary to monitor the ongoing work. After making several changes to the model, it is recommended to execute calculation to make sure that the simulation works. Without this self-monitoring, the user is likely to receive error messages while trying to calculate after a great amount of changes at one time. It's hard to fix these errors and the wisest thing is to avoid them.

The program has a comprehensive guide book which helps in most of the problematic cases. If the guide book doesn't have an answer, it's best to contact the technical support of GT-Suite. According to the experience of the writer, the technical support answers emails in a reasonable time.

The model operated as expected. The results match well with reality. The earlier reference calculation results were 11 % higher compared to the calculations in this thesis. Considering that the reference calculations weren't exact it can be assumed that the order of magnitude is correct in both calculations.

KEYWORDS:

Simulation, Modelling, Electric bus, Energy consumption

SISÄLTÖ

KÄYTETYT LYHENTEET TAI SANASTO	6
1 JOHDANTO	7
2 TAUSTATIEDOT	9
2.1 Käytetty laitteisto	9
2.2 Linkker 13 -sähkölinja-auto	9
2.3 Linjan 1 ajoreitti	12
3 GT-SUITE -MALLINNUSOHJELMA	14
3.1 GT-ISE	14
3.2 GT-POST	15
4 LASKENTAMALLIN LAADINTA	16
4.1 Mallin luominen	16
4.1.1 Ajoneuvo (<i>Vehicle</i>)	17
4.1.2 Sähkömoottori (<i>Motor</i>)	19
4.1.3 Korkeajänniteakku	19
4.1.4 Ohjauskomponentit	20
4.1.5 Reittitiedot	21
4.1.6 Reittitietojen suodatus	22
4.2 Laskenta	23
5 TULOSTEN TARKASTELU	24
6. LOPUKSI	32
7. YHTEENVETO	34
LÄHTEET	35

LIITTEET

- Liite 1. Tulokset massalla 9 900 kg
- Liite 2. Tulokset massalla 12 950 kg
- Liite 3. Tulokset massalla 16 000 kg
- Liite 4. Tapausten (*Case*) selvennys

KAAVAT

Kaava 1. Ajoneuvon otsapinta-alan laskenta.	18
Kaava 2. Akkukapasiteetin yksikönmuunnos.	19
Kaava 3. Ulkoisen energian kulutuksen määrittäminen.	26
Kaava 4. Regeneroivan jarrutuksen tuottaman energian määrittäminen.	26
Kaava 5. Kokonaisenergiankulutuksen määrittäminen.	27
Kaava 6. Energian määrittäminen.	28
Kaava 7. Vetopyöräenergian määrittäminen.	28

KUVAT

Kuva 1. Linjan 1 ajoreitti kartalla (Föli 2017).	12
Kuva 2. Electric Vehicle pääkokoonpano.	17
Kuva 3. Case Setup-Valikko.	22

TAULUKOT

Taulukko 1. Tekniset tiedot. (Linkker 2016)	9
Taulukko 2. Laskennan tapauksien nopeustiedot	24

KÄYTETYT LYHENTEET TAI SANASTO

Lyhenne	Lyhenteen selitys (Lähdeviite)
A	Ajoneuvon otsapinta-ala
a	leveys
CAE	Computer-aided engineering
DOS	Disk Operating System
E	Energia
GPS	Global Positioning System
h	korkeus
I	Virta
P	Teho
SOC	State of charge eli akun varaustaso
t	Aika
U	Jännite
3D	three-dimensional

1 JOHDANTO

Opinnäytetyön aiheena on Turun uusien linjalla 1 ajavien sähköisten linja-autojen mallinnus GT-Suite -simulointiohjelmiston avulla. Tarkoituksena on kerätä tarvittavat lähtötiedot mallin luomiseen ja tämän jälkeen tutustua ohjelman käyttöön, luoda toimiva malli ja simuloida sen avulla bussin kulkua linjalla. Tulosten tarkastelu painottuu energiankulutukseen. Erityisesti saatuja vetopyöräenergiaa verrataan Turun AMK:n aiemmissa tutkimuksissa saatuihin tuloksiin.

Suomessa on siirrytty liikenteen sähköistämiseen linja-autoihin. Turun kaupunki on antanut toimeksiannon Turun ammattikorkeakoululle liittyen Turun kaupungin linja-autoverkkoston sähköistämiseen. Yhtenä osana tätä toimeksiantoa koulun on löydettävän oikeanlaisia työkaluja sähköisten linja-autojen tutkimiseen. GT-Suite -simulointiohjelma on yksi näistä työkaluista. Ohjelmasta ei kuitenkaan Turun ammattikorkeakoululla ole aiempaa tuntemusta tai käyttäjäkokemusta. Opinnäytetyössä tutustutaan ohjelman ominaisuuksiin ja soveltuvuuteen tutkimus- ja opiskelukäyttöön.

Ennen tätä tutkimusta Turun ammattikorkeakoululla ei ole ollut käytössään vastaavan laajuista simulaatio-ohjelmaa. Turun bussiverkkoston sähköistymisen mahdollinen jatkumo edellyttää Turun ammattikorkeakoulua kehittämään uusia työkaluja asiantuntijapalveluidensa tehostamiseksi. Tehokkaasti toimivan simulaatio-ohjelmiston avulla voidaan empiirisiä tutkimuksia jättää vähemmälle. Simulaatiolla on helppoa ja edullista korvata muutoin aikaa ja rahaa vieviä käytännön mittausprojekteja. Simulaatioiden valmistuttua voidaan siirtyä testaamaan teoriaa käytännössä.

Opinnäytetyön lähteinä käytettiin GT-Suite -ohjelmiston manuaalia, Turun kaupungin joukkoliikenteen (FÖLI) internet-sivuja, Bosch Automotive Handbook -kirjaa, muutamia Wikipedia-artikkeleita ja sähköpostiviestintää GT-Suite -ohjelmiston teknisen tuen kanssa. Lähteiden pieni määrä johtuu opinnäytetyön laadusta. Iso osa työstä oli toimivan mallin luomista ja testaamista, jolloin itse teoriaosuus jäi pienemmälle huomiolle.

Ohjelmiston manuaali on hyvin laaja ja siellä on selitetty englanniksi kunkin ohjelmaan syötettävän parametrin tarkoitus. Myös esimerkiksi graafisten kuvaajien akseleiden merkitys on selitetty seikkaperäisesti. Ohjelmiston tulosten tarkasteluosasta (GT-Post) ei löydy ohjeita yhtä laajasti kuin itse mallin luomiseen liittyvästä oppaan osuudesta. Jonkin asian jäädessä epäselväksi voi ottaa yhteyttä ohjelman tekniseen tukeen. Parhaiten tuki

toimii, kun selittää ongelmansa mahdollisimman yksinkertaisesti ja liittää käyttämänsä simulaatiotiedoston sähköpostin liitteeksi.

Turun joukkoliikenteen nettisivuilta haettiin karttatieto reitistä, sekä selitys reitin kulusta kirjallisesti kertomalla kaikki kuljetut kadut järjestyksessä. Tieteellisten artikkelien avulla todennettiin muutamia teoreettisia yksityiskohtia. Suoranaista artikkelia liittyen vetopyöräenergiaan ei löytynyt, joten lähteenä oli käytettävä vetopyörätehoon liittyvää artikkelia. Tämän jälkeen oli vielä todettava erikseen tehon ja energian yhteys.

Bosch Automotive Handbook on erittäin laaja ajoneuvotekniikan kirja. Siellä on selitetty hyvin teknisesti kaikki erilaisiin ajoneuvoihin kuuluvat komponentit. Opinnäytetyö sisältää akkuteoriaa tämän kirjan pohjalta. Sähkömoottoriosuus kirjassa on huomattavasti kaa-
vapainoiteisempi kuin korkeajänniteakusta kertova osa. Kirjassa ei kerrota esimerkiksi sähkömoottorien vahvuuksista verrattuna polttomoottoreihin.

Työn tavoitteena on luoda ohjelmalla mahdollisimman onnistunut malli, jonka pohjalle voidaan luoda useampia parametreja huomioon ottavia simulaatioita. Tavoitteena on varsinaisten tulosten lisäksi saada tietämystä ohjelman käytöstä ja sen soveltuvuudesta oppilaitoksen käyttöön. Mallin toimivuutta voidaan tarkastella vertailemalla saatuja tuloksia todelliseen dataan ajoneuvosta. Erityisesti vetopyöräenergiaa voidaan verrata Turun AMK:n aiemmin saamiin tuloksiin.

Työn alussa selitetään käytettäviä taustatietoja, jotka sisältävät ajoneuvon tekniset tiedot, teoriaa litium-ioni korkeajänniteakusta sekä linjan 1 reittitiedot. Taustatietoja seuraa teoriasuus käytettävästä GT-Suite -ohjelmiston eri osa-alueista. Seuraavana selitetään yksityiskohtaisesti mallin luominen ja tästä jatkumona seuraa laskenta sekä tulosten tarkastelu. Lopuksi pohditaan luodun mallin onnistumista ja palataan työtä tehdessä tehtyihin huomioihin.

2 TAUSTATIEDOT

2.1 Käytetty laitteisto

Tietokone oli Levono Think Pad T 530, jossa oli Intel Core i7-3610QM 2,30 –GHz prosessori, RAM muistia 8,00 GB, näytön resoluutio 1600 x 900, Levonon oma näytönohjain ja käyttöjärjestelmänä 64-bittinen Windows 7 Enterprise, Service Pack 1. Vastaavat simulaatio-ohjelman vähimmäisvaatimukset ovat välimuistin (RAM) osalta 8,00 GB ja näytön resoluution 1280 x 768. Tehokkaamman prosessorin kerrotaan nopeuttavan laskentaa. Ohjelma tarvitsee toimiakseen 5 GB kovalevytilaa. Vanhin Windows-versio, jonka kanssa ohjelma on yhteensopiva, on Vista. (Gamma Technologies 2017a.) Ohjelman voidaan todeta toimivan kelvollisesti käytetyllä laitteistolla.

Ulkoisena laitteena tietokoneeseen tuli kiinnittää vesileiman sisältävä GT-Suite -lisenssin validoiva USB-muistitikku. Myös lisenssitiedoston on löydyttävä käytettävältä tietokoneelta. Alussa tarkoituksena oli pitää kyseinen tikku kiinni koululla sijaitsevassa serverissä, johon oli tarkoitus yhdistää etäkäytön aikana käyttäen VPN-yhteyttä. Tietoturvaongelmista johtuen jouduttiin tikku kuitenkin kytkemään suoraan käytössä olleeseen kannettavaan tietokoneeseen.

2.2 Linkker 13 -sähkölinja-auto

Tutkimuskohteen, Linkker 13 -sähkölinja-auton tekniset tiedot esitetty taulukossa 1.

Taulukko 1. Tekniset tiedot. (Linkker 2016)

Mitat:	
Pituus	12,88 m
Leveys	2,53 m
Akseliväli	6,76 m
Etuylytys	2,81 m
Takaylytys	3,31 m
Korkeus	3,44 m
Matkustajamäärä	44 istuvaa + 33 seisovaa
Omamassa	9900 kg
Kokonaismassa	16000 kg
Ovet	2 + 2 + 1 (Turun konfiguraatio)

Moottori:	
Visedo-sähkömoottori	PDR-XSe-1600-T660
Vääntömomentti maksimi	1316 Nm
Vääntömomentti jatkuva	660 Nm/ 1500 rpm
Maksimipyörintänopeus	2400 rpm
Vetoluistonestojärjestelmä	

Vaihteisto:	
Suoraveto, ei vaihteistoa	
Perävälitys	4,89

Akselit:	
Etuakseli	DANA NDS 56 LF
Taka-akseli	DANA G150
Levyjarrut	Lukkiutumattomat (ABS)

Renkaat:	
Koko	285/70 R 19,5
Rengaspaineet edessä	8,5 bar
Rengaspaineet takana	8,5 bar

Jousitus:	
Ilmajousitus	
Tasonsäätö	
Niiaus	

Sähköjärjestelmä:	Siemens VDO KIBES CAN
Korkeajänniteakku	Lithium-titanaattioksidi
Energiasisältö	55 kWh
Jännite	700 V
apulaitejännite	24 V

Ilmastointi ja lämmitys:	
Sähkökäyttöinen eberspächer-lämpöpumppu	Viilennykseen ja lämmitykseen
Erillinen lämmityslaite kuljetajalle	
Eberspächer-polttoainelämmitin	
Tuulilasin lämmitys	

Yleisesti polttomoottorilla varustettuihin linja-autoihin verrattuna sähköbussien teknisissä tiedoissa ja rakenteessa on muutamia huomattavia eroja. Suurimmat poikkeukset ovat moottorissa, voimansiirrossa ja energian varastoinnissa.

Akku

Nykyisissä sähköajoneuvoissa käytetään litiumioni (Li-Ion) -akkuteknologiaa. Tämä teknologia on syrjäyttänyt aiemmin korkeajänniteakuissa käytetyn nikkelimetallihydridi (NiMH) -rakenteiset akut muutamia poikkeuksia lukuun ottamatta. Litiumioniakkujen kapasiteetti painoon nähden on parempi kuin nikkelimetallihydridiakuissa. Kapasiteetista johtuen on todennäköistä, että litiumioniakut syrjäyttävät nikkelimetallihydridiakut täysin. (Reif ym. 2014, 1135.)

Litiumioniakkujen arvioitu yhden kennon keskijännite on 3,7 voltia. Jännitteen vaihteluväli kennossa rajoitetaan 2.8–4.2 volttiin. Kennojen positiivisena elektrodina eli katodina käytetään metallioksiedeja, joissa käytettävät metallit ovat aktiivisia materiaaleja kuten nikkeli, magnesium ja koboltti. Negatiivisena elektrodina eli anodina kennoissa käytetään grafiittia. Uusimmissa kennoissa anodi on grafiitin sijasta litium-titanaattioksidia. Tällaisella kennorakenteella saavutetaan parempi energia- ja tehotehoisuus. (Reif ym. 2014, 1135.) Linja-autoissa käytetään juuri litium-titanaattikennotekniikkaan perustuvaa korkeajänniteakkua.

Litiumioniakku vaatii huomattavasti enemmän akun ympäristöä tarkkailevaa tekniikkaa muihin akkurakenteisiin verrattuna. litiumioniakun eliniän ja turvallisen käytön takaamiseksi on akun varaus, jännite ja lämpötila pystyttävä pitämään tarkkaan etukäteen määrättyjen rajojen sisällä. Litiumioniakut eivät kestä laisinkaan ylilatausta. Edellä mainituista syistä johtuen on akun valvonta tärkeää. (Reif ym. 2014, 1136.) Valvonnan ansiosta on mallinnukseen tarjolla paljon reaaliaikaista dataa, joka on saatavissa linja-auton monipuolisesta tiedonkeruujärjestelmästä. Kyseessä ovat siis mitatut arvot, jotka ovat vastaavia, jotka simulointimalli antaa laskennan tuloksina. Linja-auton tiedonkeruujärjestelmästä ei saada helpotusta puuttuviin lähtöarvoihin, vaan ne voivat lähinnä helpottaa lähtöarvojen arviointia.

2.3 Linjan 1 ajoreitti

Linjan päätepysäkkeinä toimivat Turun lentoasema ja Turun matkustajalaivasatama. Pidempi pysähdys pidetään Kauppatorilla, jossa linja-auto odottaa noin viisi minuuttia, riippuen siitä kuinka hyvin se on pysynyt aikataulussa.



Kuva 1. Linjan 1 ajoreitti kartalla (Föli 2017).

Lentoasemalta lähdettäessä tarkka reittikuvaus on ”Lentoasema - Lentorahdintie - Lentoasemantie - Rydöntie - Kärsmäentie - Raunistulan puistotie - Tampereentie - Aninkaistensilta - Aninkaistenkatu - Maariankatu - Aurakatu - Kauppatori T6 - Aurakatu - Linnankatu - 2. Poikkikatu - 1. Linja – Satama”. (Föli 2016).

Satamasta lentoasemalle reitti on lähes sama. Poikkeava kohta on kauppatorilla, joka kierretään eri puolelta kuin lentoasemalta tultaessa. Satamasta lähdettäessä tarkka reittikuvaus on ” Satama - 1. Linja - 2. Poikkikatu - Linnankatu - Aurakatu - Eerikinkatu -

Kauppatori T40 - Eerikinkatu - Aninkaistenkatu - Aninkaistensilta - Tampereentie - Raunistulan puistotie - Kärsämäentie - Rydöntie - Lentoasemantie – Lentoasema” (Föli 2016).

3 GT-SUITE -MALLINNUSOHJELMA

GT-Suite on Gamma Technologies, LLC:n kehittämä teollisille aloille suunnattu simulaation työkalu, joka sisältää mahdollisuuksia täysin uuden mallin luontiin sekä suuren valikoiman valmiiksi räätälöityjä kokoonpanoja ajoneuvomallintamiseen ja muuhun. Valmiit kokoonpanot mahdollistavat nopean ja sulavan työskentelyn, kokeneemmat käyttäjät voivat luoda omat kokoonpanonsa aloittaen tyhjästä. Ohjelmalla on mahdollista simuloida koko ajoneuvoa, eri osakokoonpanoja tai pelkästään jotain komponenttia. (Gamma Technologies 2017b.)

GT-Suite on CAE-simulointiohjelmisto. Kirjasto sisältää pohjia fysikaaliseen mallintamiseen nesteen virtauksen, termodynamiikan, mekaniikan, sähkötekniikan, magnetismin, kemian ja näiden ohjauksen osalta. Valmiita esimerkkimalleja ohjelmistossa on laajalti. Näistä löytyy sovelluksia muun muassa voimalinjan, moottorin, erilaisten ajoneuvojen, voimansiirron, vaihteiston, hybridien, pakokaasujen käsittelyn, akustiikan, lämmönhallinnan, hydrauliiikan, polttoainejärjestelmien, voitelun jne. osalta. (Gamma Technologies 2017b.)

Ohjelmisto sisältää lukuisia alaohjelmia, joilla pystytään laskennan ja tulosten tarkastelun lisäksi tuomaan 3D-malleja muista ohjelmista. Ohjelmisto sisältää myös omat 3D-mallinnustyökalut. (Gamma Technologies 2017b.) Tässä työssä keskityttiin kahden alaohjelman käyttöön, jotka olivat GT-ISE sekä GT-POST.

3.1 GT-ISE

GT-ISE (Integrated Simulation Environment) on pääsääntöinen ohjelma eri mallien luomiseen ja muokkaamiseen. Se on ympäristö, jossa luodaan halutuista komponenteista koostuva kartta. Eri komponentit linkitetään toisiinsa halutulla tavalla, näin malli saadaan toimimaan yhtenä suurena kokoonpanona. (Gamma Technologies 2017c.)

Pääkokoonpanon komponentit voivat sisältää alikokoonpanoja. Nämä alikokoonpanot voivat sisältää useita komponentteja, joiden tiedot määritetään alikokoonpanossa. Yksinkertaisimmissa malleissa pääkokoonpanon komponentit eivät sisällä alikokoonpanoja

vaan komponentin tiedot määritetään suoraan pääkokoontaan. Käytössä olevien Wizard-työkalujen avulla voidaan luoda toimivia yksinkertaisia malleja, joiden komponenteille voidaan myöhemmin rakentaa alikokoontaan. (Gamma Technologies 2017c.)

Ennen laskentaa tulee malliin määrittää, mitä lasketaan. Tämä toteutetaan Case setup -valikosta. Valikkoon voi luoda erilaisia tilanteita, joilla mallia halutaan ajaa. Laskentaparametreille valitaan yksikkö, jonka jälkeen niille voidaan syöttää jokin tietty luku tai luoda taulukko, jonka mukaan laskenta laskennassa edetään. Parametri voidaan myös asettaa viittaamaan suoraan johonkin Excel- tai ASCII -tiedostoon, jolloin laskenta hakee automaattisesti tiedoston koneelta ja käyttää siitä määritettyjä arvoja. (Gamma Technologies 2017c.)

Käsillä olevassa sähköisen linja-auton energiankulutuksen tarkkailuun keskittyvässä työssä tärkeintä oli saada laskentaan oikeat nopeudet. Parametriin luotiin uusi taulukko, joka määräsi nopeuden *km/h* ajan *s* funktiona. Kopioimalla arvot Excel-tilusta viittauksen sijaan tiedoston voi avata millä tahansa tietokoneella, ilman kyseistä Excel-tilua. Viittauksessa kyseisen taulukon on oltava aina mukana ja tiedostojen sijainnin on oltava oikea laskennan onnistumiseksi. (Gamma Technologies 2017c.)

Laskennan kesto riippuu mallin laajuudesta. Ennalta valituista monitoreista voidaan seurata laskennan kulkua reaaliajassa. Laskennan valmistuttua siirrytään tulosten tarkastelu varten GT-POST -ohjelmaan.

3.2 GT-POST

Laskennan valmistuttua tuloksia voi analysoida GT-POST -ohjelman jälkiprosessointityökalun avulla. Tulokset on saatavina näkyviin lukuisina eri kaksi- ja kolmiulotteisina taulukoina ja numeroarvoina. Eri lähtöarvoilla suoritettujen laskentojen tuloksia voi vertailla helposti ohjelman avulla. Saadut tulokset on mahdollista muuntaa ASCII- tai Excel-tiedostoiksi. (Gamma Technologies 2017d.)

GT-ISE -mallissa olevat mahdolliset epäloogisuudet aiheuttavat joko laskennan keskeytymisen tai sen, ettei laskentaa aloiteta ollenkaan. Virheellistä laskentaa voidaan tarkastella GT-POST -ohjelmalla, mutta siellä olevat tulokset ovat epäloogisia tai niitä ei ole ollenkaan mallinnusvirheestä riippuen.

4 LASKENTAMALLIN LAADINTA

Ajoneuvomallintamisessa olennaista on käyttää mahdollisimman realistisia lähtöarvoja. Valmistajalta on saatavilla joitakin ajoneuvoon liittyviä arvoja. Tietyt lähtöarvot ovat kuitenkin yritysten salassapitosäädösten piirissä.

Mallintamisen kannalta olennaiset tiedot, joita ei ole suoraan valmistajalta saatavissa, on joko mahdollisuuksien mukaan mitattava itse tai arvioitava kyseisestä komponenttityypistä olemassa olevan yleiskäsityksen mukaisesti. Omat mittaukset ovat onnistuessaan hyvä tapa määrittää puuttuvia tietoja, arviointi taas lisää mallin epätarkkuutta.

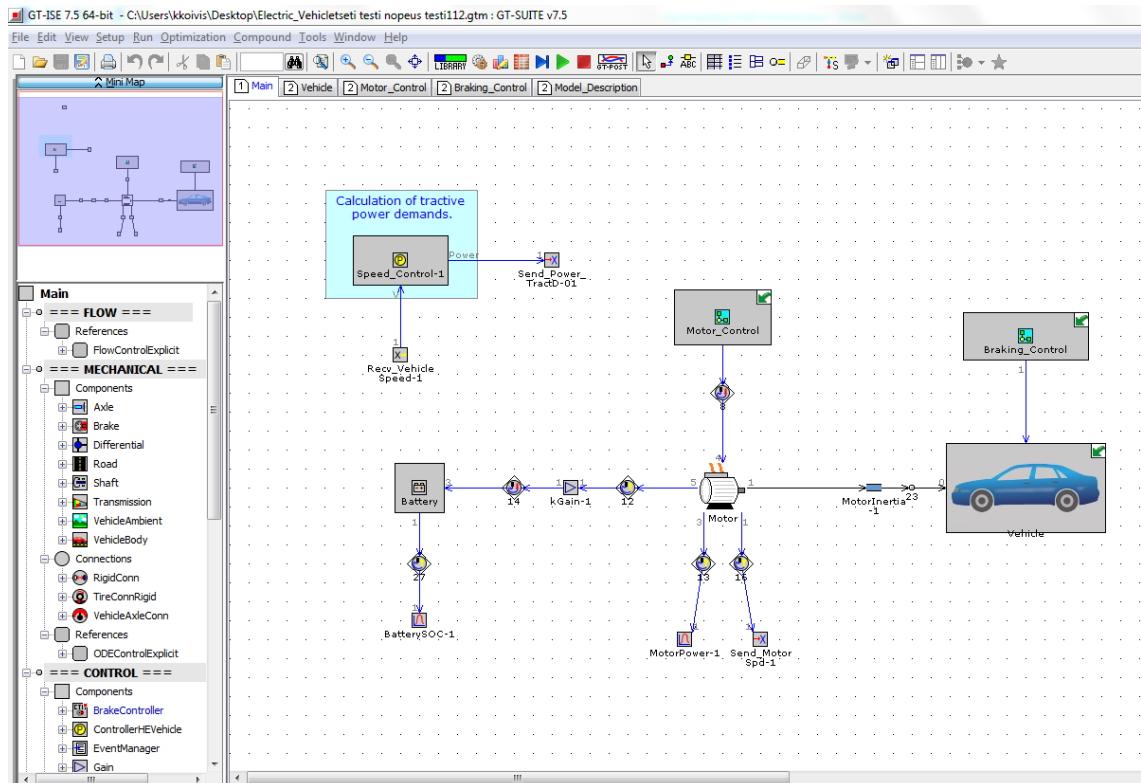
Olemassa olevista resursseista johtuen osa tämän opinnäytetyön ajoneuvon arvoista on jouduttu määrittelemään arvioimalla. Arvioinnissa tukena ovat olleet ohjaava opettaja Markku Ikonen, sekä projektipäällikkö insinööri (AMK) Panu Aho.

4.1 Mallin luominen

GT-ISE -ohjelman kirjasto sisältää useita eri esimerkkejä mallikokoonpanoista osakokoonpanoista kokonaisuun ajoneuvokokoonpanoihin. Tässä opinnäytetyössä käytetty ”Electric Vehicle”-malli löytyi suoraan esimerkeistä. Valmista mallia käyttämällä pystyttiin työn laajuus pitämään yhdelle ihmiselle realistisena. Käytettyyn malliin syötettiin kaikki saatavilla olevat ajoneuvon tiedot painottaen energiankulumiseen olennaisesti liittyviä arvoja.

Malli oli purettu osakokoonpanoihin, jotka avaamalla pääsi muuttamaan kyseiseen osaan liittyviä parametreja. Seuraavissa alaotsikoissa on kerrottu mitä kukin osakokoonpano sisältää. Eri komponentit on liitetty toisiinsa erinäisillä linkeillä, joihin ei perehdytä tässä opinnäytetyössä. Myöskään lämmön vaikutusta eri komponentteihin ei oteta huomioon sen arvioinnin vaikeudesta johtuen.

Mallinnusohjelma on englanninkielinen. Ohjelman eri osiot ja valikot on mahdollisuuksien mukaan käännetty seuraavassa tekstissä suomeksi. Suomennoksen perään on kirjoitettu kyseinen sana alkuperäisellä kielellä, suluissa ja kursivoituna, ohjelman käytön selvittämiseksi.



Kuva 2. Electric Vehicle pääkokooppa.

4.1.1 Ajoneuvo (*Vehicle*)

Kyseisen osakokoonpanon symbolina on kuva henkilöautosta. Tämä on kuitenkin pelkkä symboli, joten osakokoonpanoa voidaan käyttää myös linja-auton mallintamiseen. Osakokoonpano sisältää yhteensä viisi olennaista komponenttia: rengas (*Tire*), jarru (*Brake*), vetopyörästä (*Differential*), vaihteisto (*Transmission*) ja auto (*Car*).

Renkaat on tässä mallissa luotu kaikki samanlaisiksi, joten yhden renkaan parametri-muutokset muuttavat kaikki kolme muuta rengasta vastaavanlaisiksi. Olennaiset muokattavat arvot renkaalla ovat pyörän vierintäsäde (*Explicit Tire Rolling Radius* 434,5 mm) ja -vastuskerroin (*Tire Rolling Resistance Factor* 0,01). Vierintäsäde löytyy STRO-ren-gasnormistosta rengaskoon 285/70 R 19,5 kohdalta. Vierintävastus on arvioitu yleisen tietämyksen mukaan.

Jarrut on renkaiden tapaan luotu kaikki samanlaisiksi. Jarrumomentti syötetään xyz-koordinaatistoon, jossa x-akseli kuvaa prosentuaalista jarrupolkimen asentoa (0 = pol-jinta ei paineta, 100 = poljin on pohjassa), y-akseli kuvaa akselin pyörintänopeutta ja z-

akseli kertoo jarruvoiman maksimin x- ja y-arvoilla. Ohjelmaan syötettävän halutun nopeustiedon avulla laskenta määrittelee itse kulloinkin tarpeellisen jarrumomentin ja polkimien asennon. Jarrumomentin suurimmaksi mahdolliseksi arvoksi arvioitiin 5 kNm yhdellä pyörällä. Koko jarrujärjestelmän tuottama maksimijarrumomentti on siis 20 kNm. Arvioidulla jarrumomentilla saavutettiin simuloinnissa riittävän suuri hidastuvuus. Todellinen jarrumomentti on todennäköisesti mallissa käytettyä suurempi.

Katsastusmääräyksien mukaan raskaan ajoneuvon on saavutettava 5 m/s^2 hidastuvuus. Saatu tulos on hieman tämän alle, mutta suuruusluokka on kohdallaan, koska bussilinjalla ei todellakaan ole tarkoitus käyttää maksimaalista saavutettavaa hidastuvuutta.

Vetopyörästö-komponenttiin syötettiin sen välitys (*Final Drive Ratio* 4,89) (Ikonen, M. Henkilökohtainen tiedonanto 27.1.2017). Vetopyörästön hyötysuhteesta ei ollut saatavilla tietoa, joten se jätettiin huomioimatta.

Vaihteiston mekaanisessa komponentissa (*Transm-01*) saadaan määritettyä kunkin vaihteen välityssuhde (*Gear ratio*). Mahdollista on myös säätää muun muassa kunkin vaihteen hyötysuhdetta (*In gear efficiency*), vaihteiden hitausmomentteja (*Moment of inertia*), sekä vaihteen vaihtoaikaa (*Gear ratio transition time*). Välityssuhteiden avulla määrittäyty kullakin vaihteella vetopyörästölle siirtyvä momentti ja pyörintänopeus.

Vaihteiston ohjauskomponentissa (*TransControl*) saadaan määritettyä vaihtamisstrategia (*Transmission Shift Strategy Object*) automaattivaihteiselle ajoneuvolle. Strategialla määritellään millä ajoneuvon nopeudella ja millä moottorin kuormituksella vaihteisto vaihtaa suuremmalle ja millä pienemmälle.

Linja-autossa ei ole vaihteistoa, joten syöttämällä 1. vaihteen välityssuhteeksi 1 ja määrittämällä vaihteiston ohjauksen (*Transcontrol*) pitämään jatkuvasti 1. vaihde päällä, voidaan eliminoida vaihteiston toiminta. 1. vaihteen hyötysuhde on tässä mallissa 100 %.

Autokomponentti on tämän osion laajin. Siinä määritellään ajoneuvon kokonaisuudessa, aerodynamiikka (*Aerodynamics*) ja akseligeometria (*Axles/Geometry*). Massa koostuu ajoneuvon omamassasta (*Vehicle mass* 9900 kg) sekä matkustajien ja kuorman massasta (*Passenger and Cargo mass* 0-6100 kg). Aerodynamiikkaan syötettiin ilmanvastuskerroin (*Vehicle Drag Coefficient* 0,47) ja ajoneuvon otsapinta-ala kaavan 1. mukaisesti (*Vehicle Frontal Area* $8,7 \text{ m}^2$).

$$A = h \cdot a = 3,44 \text{ m} \cdot 2,53 \text{ m} = 8,7032 \text{ m}^2 \approx 8,7 \text{ m}^2$$

Kaava 1. Ajoneuvon otsapinta-alan laskenta.

Ajoneuvon otsapinta-ala saadaan laskettua teknisistä tiedoista. Ilmanvastuskerroin on arvio joka perustuu linjalla 1 kulkevan Scanian 230UB4X2LB -linja-auton vastaavaan arvoon (Ikonen, M. Henkilökohtainen tiedonanto 8.9.2016). Sen voidaan olettaa olevan kohtalaisen lähellä todellisuutta, sillä molempien linja-autojen korirakenne on moderni.

Akseligeometriaan syötettäviä tietoja olivat akseliväli (*Vehicle Wheelbase* 6,76 m) ja painopisteen etäisyys taka-akselilta, joka arvioitiin (*Horizontal Dist From Last Rear Axle to Mass Center* 3 m).

4.1.2 Sähkömoottori (*Motor*)

Sähkömoottorikomponentti ei sisällä erillistä alakokoonpanoa vaan tiedot syötetään suoraan pääkartan komponenttiin. Moottorivälilehdellä oleellinen tieto on moottorin hyötysuhde (*Electromechanical Conversion Efficiency*), joka syötetään koordinaatistona, jossa x-akselin (moottorin kierrosluku kierroksina minuutissa, eli RPM) ja y-akselin (moottorin vääntömomentti) funktiona ilmoitetaan moottorin elektromeekaanin hyötysuhde taulukon z avulla.

Tehon ohjaus (*Power Control*) -välilehdelle syötetään moottorin maksimivääntömomentti (*Maximum Brake Torque Nm*) kullakin moottorin kierrosluvulla. Sähkömoottori voi toimia myös generaattorina eli se voi ladata linja-auton korkeajänniteakkua. Generaattoriominaisuudesta johtuen vääntömomentille syötetään myös negatiiviset arvot.

4.1.3 Korkeajänniteakku

Pääasiallinen (*Main*) -välilehdelle syötetään akun prosentuaalinen varaus laskennan alussa. Linja-auto lataa pikalatauksella akun 80 % varaustasoon asti, joten sopiva arvo tähän on 0,8. Varaustila (*SOC Model*) -välilehdelle syötetään akun kapasiteetti (78,57 Ah) valittavissa olevana yksikkönä ei ole valmistajan antaman arvon 55 kWh:n mukaista yksikköä, joten on suoritettava yksikönmuunnos kaavan 2 mukaisesti.

$$It = \frac{Pt}{U} = \frac{55 \text{ kWh}}{700 \text{ V}} = 78,571 \dots \text{ Ah} \approx 78,57 \text{ Ah}$$

Kaava 2. Akkukapasiteetin yksikönmuunnos.

Myös akkujännitteen muutos akun varauksen laskiessa syötetään tälle välilehdelle karttamuodossa. X-akselille syötetään varaus 10 % välein (0 = tyhjä 1 = täynnä), ja y-akseli kuvaa akun käyttölämpötilaa kelvineinä. X- ja y-akseleiden arvoilla saadaan z:n arvot, jotka kuvaavan akun jännitettä.

Käytetyn esimerkkimallin kohdalla on huomioitava akkukomponentin *options*-välilehdellä olevat kertoimet. Taulukossa oleva z-arvo, eli jännitteen arvo, on kerrottu 25:llä. Syötettävän jännitteen on oltava $\frac{1}{25}$ todellisesta, jotta laskenta menee oikein. Selkeämpi vaihtoehto on muuttaa kerroin yhdeksi ja syöttää suoraan jännitteen oikea arvo. Käytettäessä esimerkkimalleja on syytä tarkastaa kaikkien komponenttien tietojen välilehdet mahdollisten vastaavien kertoimien havaitsemiseksi.

Myös akun sisäinen resistanssi (*Internal Resistance Map*) määritellään taulukkona, mutta se pidetään oletusarvoissaan. Valmistajalta ei ole saatu tarkempia tietoja todellisista arvoista.

4.1.4 Ohjauskomponentit

Ohjauskomponentteja käytetyssä pääkoonpanossa on kolme: nopeuden ohjaus (*Speed Control*), moottorinohjaus (*Motor Control*) ja akkuja lataavan jarrituksen ohjaus (*Braking control*).

Nopeuden ohjauksessa valitaan ensin *main* -välilehdeltä ohjaustila. Tiloja on neljä: nopeuteen (*Speed*), kiihtyvyyteen (*Acceleration*) ja kuormitukseen tähtäävä (*Imposed Load Targetting*) sekä edellä mainittujen sekoitus (*Mixed Mode*). Tässä mallissa valittiin nopeustila, jolla on paras mallintaa linjalla ajavaa linja-autoa, jonka etenemisnopeus ajan suhteen on saatavilla.

Edistynyt (*Advanced*) -välilehdeltä on mahdollista vaikuttaa toivotun nopeuden ja laskennalla saatavan todellisen nopeuden suhteeseen. Parametreja tähän on useita, mutta toimivimmaksi osoittautui todellisen nopeuden aikaistaminen toivottuun nopeuteen verrattuna. Aikaistamisella saatiin todellinen nopeus pysymään paremmin tavoitenopeuden tahdissa laskennan aikana. Tätä pystyi seuraamaan laskennan edetessä sen alussa avautuvasta nopeusmonitorista sekä vertailemalla tuloksista linja-auton kulkemaa matkaa mallin ja todellisuuden välillä. Toisenlaisen ajoneuvon mallintamisessa näitä säätöjä ei tarvitse välttämättä muuttaa, jos ajoneuvon todellinen ja tavoitenopeus ovat tarpeeksi

lähellä toisiaan. Mallinnuksen loppuvaiheessa tulleiden uusien suurempien moottorin momenttitietojen käyttöönoton jälkeen päätettiin aikaistamisesta luopua.

Moottorinohjauksen takaa avautuu pieni alikokoonpano. Moottorinohjauksen annettiin olla oletusasetuksilla. Tarpeelliset muutokset moottorin toimintaan tehtiin suoraan sähkömoottorikomponentissa.

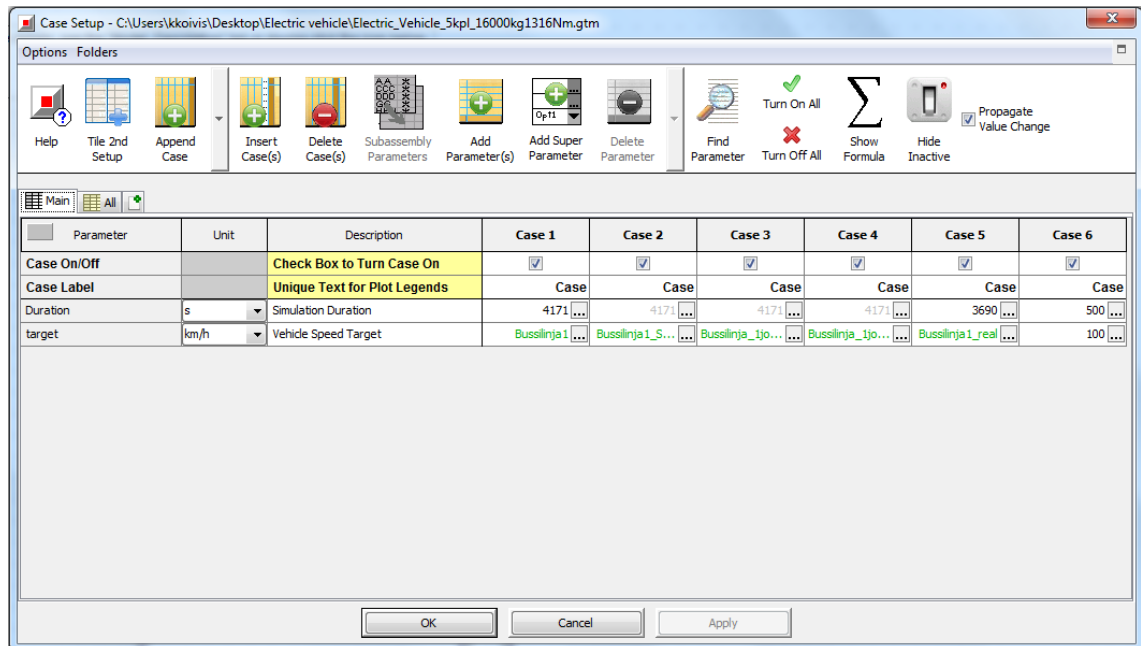
Jarrujen ohjauksella on myös alikokoonpano. *Regenposition*-komponentin jarrumomentti muokattiin vastaamaan ajoneuvon yhden pyörän jarrumomenttia. EM1MinTq-1-komponentin parametrille *Table or Function Object Name* syötetään akkujen lataamiseen eri pyörintänopeuksilla kohdistuva momentti taulukkomuodossa. Syötetty taulukko vastaa moottorin tietoihin syötettyä moottorin pienintä momenttia (*Minimum Brake Torque*). Taulukon asetuksista muutettiin vielä momentin kerroin niin että hyödynnettävä momentti on 25 % todellisesta. Tämä perustuu arvioon regeneroivien jarrujärjestelmien yleisen hyötysuhteen suuruusluokasta. Akkuja lataava jarrutus on mahdollista kytkeä pois valitsemalla EM1MinTq-1-komponentin ja syöttämällä *Table or Function Object Name*-arvoksi nolla.

4.1.5 Reittitiedot

Ajoneuvon ja sen komponenttien tietojen syöttämisen jälkeen tulee määrittää käyttö- ja liiketila. Reitillään kulkevan linja-auton tapauksessa määritetään ajoneuvon nopeus linjan eri osissa. Tähän käytettiin linja-auton perässä ajetulla mittausautolla saatua GPS-dataa sekä suoraan linja-auton omasta tiedonkeruujärjestelmästä saatua dataa. Käytetyt nopeustiedot ilmoittavat nopeuden ajan funktiona.

Mittausautossa käytettiin Turun AMK:n Race Technology DL2 -tiedonkeruulaitteistoa (logger serial number 10241, firmware version 13-7). Laitteisto koostuu pääyksiköstä, johon liitetään GPS-signaalianturi. Käyttövirtansa laite ottaa ajoneuvon 12 V jännitepistokkeesta tai ulkoisesta virtalähteestä. Tällä laitteistolla mitattu nopeustieto on mitattu 10 hertzin taajuudella eli nopeustieto on jokaiselta sekunnin kymmenykseltä. Itse tiedonkeruu ei kuulunut tähän työhön, vaan on toteutettu osana aikaisempaa linjan 1 sähköistysprojektia. Linja-auton omasta tiedonkeruujärjestelmästä saadaan nopeustieto, joka on ilmoitettu 5 sekunnin välein.

GT-Suite -ohjelmassa reittitiedot syötetään ”Case setup” -valikkoon työkaluriville. Avautuvaan ikkunaan voidaan luoda erilaisia tapauksia (Case), miten mallinnettavaa ajoneuvoa ajetaan. Luoduista ajomalleista valitaan, mitä niistä halutaan käyttää laskennassa. Laskemalla useita tapauksia kerralla voidaan niiden tuloksia vertailla kätevästi GT-Post ohjelmalla. Aikaa säästyy, kun lasketaan kerralla vain tarpeelliset ajomallit.



Kuva 3. Case Setup-Valikko.

Tässä mallissa syötettävät tiedot ovat koko ajon kesto (*Duration*) ja ajoneuvon tavoite-nopeus (*target*). Tavoitenopeutena käytettiin Excelistä kopioitua taulukko dataa liittämällä se tavoitenopeusvalikosta avattavaan xy -koordinaatitioon. Ajon keston tulee vastata nopeustaulukon kesto.

4.1.6 Reittitietojen suodatus

Nopeustiedossa, joka on mitattu linja-auton perässä ajamalla käyttämällä GPS-signaalia, on havaittavissa häiriötä jokaisella pysähdyksellä. Kohinan suuruus vaihtelee 0,1-1,0 km/h, vaikka linja-auto on täysin pysähdyksissä esimerkiksi ottaessaan matkustajia kyytiin tai matkustajien noustessa bussista. Ajoneuvon ollessa pienessä liikkeessä sen energian tarve kiihdytykseen on pienempi verrattuna paikallaan olevaan ajoneuvoon. Toisaalta paikallaan oleva sähkömoottori ei kuluta energiaa. Suodattamalla alkuperäistä käyrää saadaan se vastaamaan paremmin realistista tilannetta.

Kohinaa poistettiin Matlab-ohjelmiston avulla. Ohjelmaan syötettiin koodi, jonka avulla muunnettiin kaikki taulukon alle 1 km/h nopeudet 0 km/h nopeudeksi. Lopuksi Matlab-taulukko muutettiin Excel-tiedostoksi.

4.2 Laskenta

Ennen laskentaa valitaan suoritettavat laskut Case Setupista. Eri tapauksien Case erot on selvennetty liitteessä 4. Laskenta aloitetaan painamalla vihreää nuolta työkaluriviltä. Nuolen painallus avaa *Simulation Wizard* -ikkunan. Ikkunasta on mahdollista valita, käytetäänkö laskentaan sisäistä vai ulkoista prosessoria ja kuinka monta ydintä prosessorista käytetään laskentaan. Mahdollista on myös valita laskennan graafinen ulkoasu. Laskennan aikana on mahdollista saada näkymään aiemmin määriteltyjä monitoreja, jotka helpottavat laskennan seuranta sen ollessa käynnissä.

Jos laskennan reaaliaikainen seuranta ei ole tarpeen, voidaan valita DOS-pohjainen laskenta, jolla tulosten tarkastelu onnistuu vasta laskennan loputtua. Suositeltavaa on käyttää 64-bittistä laskinta, sillä se on pääsääntöisesti nopeampi kuin 32-bittinen. Jos käytettävä tietokone ei pysty suorittamaan 64-bittisiä operaatioita tulee valita hitaampi 32-bittinen.

Tässä mallissa on laskennan aikana mahdollista seurata akun varaustason, tehon tarpeen ja tavoite- sekä todellisen nopeuden käyriä. Yhden linjan 1 tapauksen laskenta kestää noin 2 min 30 s. Laskennan voi keskeyttää ja palata muokkaamaan mallin arvoja, jos jokin virhe havaitaan monitorikäyristä. Keskeytysmahdollisuus nopeutti huomattavasti mallin luomista. Laskennan valmistuttua ohjelma siirtyy automaattisesti tarkastelemaan tuloksia GT-POST -ohjelman puolelle.

5 TULOSTEN TARKASTELU

Mallin valmistuttua suoritettiin laskenta. Laskennat suoritettiin kolmella eri kokonaisuudessa: tyhjä ajoneuvo, puolillaan matkustajia ja kuormaa oleva ajoneuvo sekä täysin kuormattu ajoneuvo. Ajoneuvon omamassan on ollessa 9900 kg, käytettiin tätä arvoa tyhjällä ajoneuvolla. Matkustajia ja muuta kuormaa ajoneuvon voidaan lastata maksimissaan 6100 kg. Puolilleen kuormatun linja-auton kokonaisuudessa on siis 12 950 kg ja täyden 16 000 kg. Laskennasta tehtiin Excel taulukko, jonka tulokset on taulukoitu liitteisiin 1-3.

Jokaisella massalla laskettiin arvot kuudella eri nopeustiedolla. Nopeustiedot tapauksissa 1-5 olivat bussilinjalta ja kuudennella tiedolla määritettiin ajoneuvon maksimikihtyvyys. Tapaukset numerojärjestyksessä olivat:

Taulukko 2. Laskennan tapausten nopeustiedot

Tapaus	Reitin selite
1	Tiedonkeruulaitteisto DL2:lla mitattu nopeus. Bussi pysähtyy kaikilla pysäkeillä.
2	Vastaavat tiedot kuin 1, mutta alle 1 km/h nopeudet muutettu 0 km/h:ksi.
3	DL2:lla mitattu nopeus. Bussi pysähtyy joka toisella pysäkillä.
4	Vastaavat tiedot kuin 3, mutta alle 1 km/h nopeudet muutettu 0 km/h:ksi.
5	Bussin omasta tiedonkeruujärjestelmästä saatu nopeustieto.
6	Tavoitenopeus 100 km/h, laskennan aika 500 s.

Tapauksissa 3 ja 4 joka toisen pysäkin poistamisen oli ohjaava opettaja Markku Ikonen tehnyt jo etukäteen. Hän käytti kyseisistä mittauksista tapausta 1 omissa raportissaan. Tapauksien 2 ja 4 alle 1 km/h nopeussuodatus suoritettiin Matlabilla opinnäytetyön puitteissa. Tapauksen 5 kuljettu matka ja käytetty aika poikkeavat neljästä ensimmäisestä huomattavasti. Tämä täytyy ottaa huomioon tulosten tarkastelussa. Tapauksella 6 varmistettiin linja-auton kiihtyvyyspotentiaali.

Tuloksissa tarkasteltavia arvoja ovat akun prosentuaalinen varaus lopussa, kulutettu ulkoinen energia kilowattitunteina, akkua jarrutuksella ladattu energia kWh, kokonaisenergiankulutus kWh, vetopyöräenergia kWh, mallin mukaan kuljettu matka kilometreinä, Ajoaika sekunteina, keskinopeus kilometreinä tunnissa ja maksimikiikkyvyys m/s^2 .

Tarkasteltaessa neljää ensimmäistä kappaletta (akun prosentuaalinen varaus lopussa, kulutettu ulkoinen energia kilowattitunteina, akkua jarrutuksella ladattu energia kWh ja kokonaisenergiankulutus kWh), tulee huomioida tulosten kertovan tilanteen saavuttaessa satamaan (ajettu noin 13 km). Näin pystytään paremmin havainnollistamaan akkukapasiteetin muutoksia kahden latauspisteen ollessa käytössä, vaikka varsinainen simulointi tehtiin edestakaiselle reitille vastaten tilannetta, jossa bussia ladattaisiin vain toisessa päässä linjaa.

Kulutettu energia (*Depleted or Added Energy*) kertoo ajoneuvon kuluttaman ulkoisen energian. Ulkoisella energialla tarkoitetaan latauspisteiltä auton akustoon ladattavaa energiaa. Kulutettu ulkoinen energia on ajoneuvon kuluttaman ja sisäisesti lataaman energian erotus. Lataava jarrutus pienentää ajoneuvon ulkoisen energian tarvetta. Ohjelman ilmoittamasta kulutetusta energiasta on vähennetty valmiiksi akun sisäiset häviöt.

Akun prosentuaalinen varaus lopussa

Akun prosentuaaliset varaukset ajoreitin lopussa vaihtelivat 67,9 % ja 45,7 % välillä. Korkein varaustaso saavutettiin pienimmällä massalla tapauksella 4 ja alhaisin varaustaso suurimmalla massalla tapauksella 1. Todellisen akun loppuvarauksen tiedon arvot vaihtelevat normaalitilanteessa 60 % ja 56,5 % välillä. Linja-auton oman tiedonkeruujärjestelmän alhaisimpien loppuvaraustasojen kohdalla varaustaso ei ole linjalle lähdeettäessä ollut 80 %, eli akun pikalataus on jäänyt vajaaksi. Normaalia lyhyempi lataus on voinut johtua aikataulutukseen liittyviin seikkoihin tai tekniseen vikaan. Alhaisemman loppuvaraustason voi aiheuttaa myös esimerkiksi kova vastatuuli tai renkaiisiin vetoluistoa aiheuttava liukas tienpinta. Nämä huomioon ottaen voidaan todeta loppuvarauksen vaihtelevan 60 % ja 56,5 % välillä latauksen onnistuessa. Simulaatiossa käytettiin lähtövaraustasona aina arvoa 80 %.

Parhaiten todellisia varaustasoja vastaavat mallit, joissa laskentamassa on joko 12 950 kg tai 16 000 kg. Suoraan todelliseen vaihteluväliin osuvia loppuvarauksia antavat tapaukset 3 ja 4 massalla 16 000 kg.

Kulutettu ulkoinen energia kilowattitunteina

Mallin ilmoittama energiankulutus akulta tarkoittaa ulkoisen energian kulutusta, josta on jo vähennetty akun sisäiset häviöt, ei siis suoraan kokonaisenergian kulutusta. Akun sisäisiin häviöihin huomioitiin tässä mallissa sisäinen resistanssi. Regeneroivasta jarrujärjestelmästä johtuen ulkoinen energiankulutus on pienempi kuin kokonaisenergiankulutus, koska jarrujärjestelmää käytettäessä ajoakusto lataantuu ja näin ulkoisen energian tarve pienenee. Ulkoisen energian kulutukselle saadaan arvoja 7,0 kWh (tapaus 4, massa 9900 kg) ja 18,1 kWh (tapaus 1, massa 16 000 kg) väliltä.

$$E_{akulta\ lähtevä\ ulkoinen} + E_{Akun\ sisäiset\ häviöt} = E_{Ulkoisen\ energian\ kulutus}$$

Kaava 3. Ulkoisen energian kulutuksen määrittäminen.

Akkua jarrutuksella lataava energia kWh

Akkua lataavan jarrutusenergian määrää ei tässä mallissa näe suoraan tuloksista. Se saadaan määritettyä poistamalla regeneroiva jarrutus käytöstä ja laskemalla näin saadun ulkoisen energiankulutuksen ja regeneroivan jarrutuksen käytössä ollessa saatavan ulkoisen energiankulutuksen erotus.

$$E_{ilman\ reg\ jarrutusta} - E_{reg\ jarrutuksella} = E_{jarrutuksen\ tuottama\ latausenergia}$$

Kaava 4. Regeneroivan jarrutuksen tuottaman energian määrittäminen.

Käytetyt regeneroivan jarrutuksen latausenergian suuruudet ovat suuntaa-antavia. Valmistajalta ei ollut tiedossa mitään arvoja tähän liittyen, joten mallin arvot pidettiin esimerkkimallin tiedoissa. Saaduista tuloksista on kuitenkin nähtävissä, mikä vaikuttaa jarrutusenergian talteenoton suuruuteen ja kuinka paljon.

Eniten energiaa saatiin talteen tapauksella 1 ja täysin kuormatulla ajoneuvolla. Tällöin energiaa saatiin talteen mallin mukaan 3,5 kWh. Vähiten energiaa taas kertyi tapauksella 3 ja tyhjällä linja-autolla. Pienin talteen otettu energia oli 1,1 kWh.

Eniten energian talteenottoon vaikuttaa jarrutusten määrä. Tapauksessa 1 jarrutuksia suoritetaan 2 kertaa enemmän kuin tapauksessa 3. Tapauksen 3 pysähdyksiin johtavat jarrutukset ovat täysin samoja kuin tapauksessa 1, joten on selvää että talteen saadaan vähemmän energiaa, koska pysähdyksiä on puolet vähemmän.

Muut merkittävimmät talteen otetun jarruenergian suuruuteen vaikuttavat tekijät ovat ajoneuvon massa ja nopeuskäyrän muoto. Suurempimassaisella ajoneuvolla on myös suurempi liike-energia, sen pienentämiseen tarvitaan suurempi jarruenergia, joten talteen saadaan myös enemmän energiaa. Tapauksen 3 nopeuskäyrästä on suodatettu joka toinen pysäkki pois. Suodatus on tehty huomioiden, että kuljettu matka on vastaava kuin tapauksen 1 nopeuskäyrällä. Joka toisen pysäkin kohdalle on tapauksessa 3 syötetty vakionopeus, joka jatkuu pysäkkikohtaisesti niin, että kokonaismatkat saadaan vastaamaan toisiaan. Joidenkin näiden vakionopeuksien aikana tapauksen 1 nopeuskäyrällä tapahtuu jarrutuksia, jotka lisäävät talteen otettua jarruenergian määrää.

Kokonaisenergiankulutus kWh

Kokonaisenergiankulutusta ei mallista näe suoraan vaan se on määritettävä laskemalla. Helpoin tapa määrittää kyseinen energia on poistaa regeneroiva jarrutus käytöstä, jolloin akun tuloksista selviää kulutettu ulkoinen energia, josta on jo vähennetty sisäinen resistanssi. Lisäämällä sisäisen resistanssi mallin antamaan kulutettuun ulkoiseen energiaan saadaan kokonaisenergian kulutus. Kokonaisenergian kulutukselle saadaan arvoja 7,8 kWh (9 900 kg tapaus 4) ja 21,5 kWh (16 000 kg tapaus 1) väliltä

$$E_{kok} = E_{ilman\ reg\ jarrutusta} + E_{akun\ sisäinen\ resistanssi}$$

Kaava 5. Kokonaisenergiankulutuksen määrittäminen.

GT-POST -ohjelman vastauksissa kerrottuja akulta kulutettua energiaa (Depleted or added energy) ei suoraan selitetä ohjelman ohjeissa. Yllä näkyvä yhteys määritettiin luomalla tapaus, jossa akku piti koko ajan nimellisjännitteensä 700 V. Tällöin akun energiakapasiteetti on 55 kWh. Ajamalla akku täydestä tyhjäksi ja suorittamalla ylläolevan kaavan mukainen laskutoimitus saatiin tulokseksi 54,99 kWh. Syynä puuttuvaan 0,01 kWh oli ajoajan tarkkuus. Akku ei mennyt täysin tyhjäksi vaan sinne jäi noin 10 Wh energiaa. Tällä ei tarkastuksen kannalta ollut merkitystä.

Akulle raskaimmissa tilanteissa, joissa ajoneuvon kokonaismassa oli 16 000 kg ja pysähdyttiin jokaiselle pysäkillä (tapaukset 1 ja 2), eikä regeneroiva jarrujärjestelmä ollut käytössä, akun 80 % varaustaso ei riittänyt mallin loppuun ajamiseen. Akun varaustasoa oli näissä tapauksissa korotettava viidellä prosenttiyksiköllä. Akun 85 % varauksella raskaimmatkin tapaukset saatiin ajettua loppuun ja niiden tuloksia päästiin tarkastelemaan.

Keskeytyneen laskennan tulosten tarkastelua avattaessa ohjelma ilmoittaa vikaviestin ja tuloksien tarkastelu on rajallista. Tuloksissa on näkyvissä vain graafisia käyriä, jotka päättyvät akun tyhjentyessä. Tarkkoja tuloksia on saatavissa vain, kun akku riittää tapauksen loppuun asti.

Vetopyöräenergia kWh

Malli ei ilmoita suoraan myöskään vetopyöräenergiaa. Vetopyöräenergia on keskimääräisen vetopyörätehon ja käyttöajan tulo. Vetopyöräteho on teho, joka moottorin tuottamasta tehosta lopulta päättyy vetäville pyörille. Moottoriteho ei suoraan siirry vetopyörille, vaan häviöitä aiheuttavat voimansiirto ja apulaitteet, kuten pumput, tuulettimet ja laturi.

Tässä mallissa apulaitteet on huomioitu moottorin hyötysuhteessa. Apulaitteista ohjaus-tehostin, ilmalämpöpumppu ja paineilmakompressori on kytketty suoraan 700 V korkeajännitejärjestelmään. Muille apulaitteille on oma 24 voltin järjestelmä, jossa kulkeva jännite kulkee muuntajan läpi ja pienenee 24 volttiin. Koska linja-autossa ei ole vaihteistoa, ei se myöskään aiheuta häviöitä. Perän hyötysuhteesta ei saatu tarkempaa tietoa, joten se jätettiin aluksi huomiotta. Myöhemmin tehtiin myös laskelmat oletetulla voimansiirron hyötysuhteella 95 %. Tässä kohtaa eitetävässä mallissa moottorilta lähtevä teho siirtyy kuitenkin suoraan vetopyörille.

$$E = P \cdot t$$

Kaava 6. Energian määritelmä.

$$E_{vp} = E_{kok} - E_{Rsis} - E_{M\eta}$$

Kaava 7. Vetopyöräenergian määrittäminen.

Vetopyöräenergia saadaan määritettyä vähentämällä kokonaisenergiankulutuksesta akun sisäisen resistanssin aiheuttamat häviöt ja moottorin hyötysuhteen aiheuttamat häviöt. Pienin vetopyöräenergia saatiin massalla 9 900 kg ja tapauksella 4, jolloin energia oli 11,8 kWh. Suurin energia saatiin suurimmalla massalla ja tapauksella 1, jolloin se oli 30,9 kWh. Vertailupohjana saaduille tuloksille oli Turun AMK:n aikaisempi raportti. Siinä täyteen kuormattu (16 100 kg) bussi tarvitsi simulaatiosta riippuen 35,5–35,7 kWh ja

tyhjä (12 650 kg) 28,1–28,3 kWh vetopyöräenergiaa. Tämän mallin vertailukelpoisimmat tulokset näihin arvoihin ovat jo yllä mainittu 16 000 kg massalla tapaus 1, sekä 12 950 kg:n massalla tapaus 1, jonka vetopyöräenergia oli 25,2 kWh.

Täyteen kuormattujen linja-autojen massojen ero on 100 kg ja tapauksen 1 nopeustiedot ovat täsmälleen samat kuin Turun AMK:n aikaisemman tutkimukset käyttämät. Lähtöarvot täsmäävät erinomaisesti. Käyttämällä samaa merkitsevien numeroiden tarkkuutta saadaan energioiden eroksi 4,6–4,8 kWh. Prosentuaalisesti ero on noin 13 %.

Tyhjän dieselbussin massa on 12 650 kg ja puolilleen kuormatun sähköbussin 12 950 kg. Massojen ero on 300 kg ja tapauksen 1 nopeustiedot täsmäävät aikaisemman tutkimuksen käyttämiin. Lähtötiedot ovat näiltä osin kohtalaisen hyvät. Ero vetopyöräenergiassa on 2,9–3,1 kWh. Tässäkin tapauksessa ero on huomattava, tosin pienempi kuin täyteen kuormattujen bussien ero. Eroa tasoittaa sähköbussin suurempi massa ja molempien bussien pienempi massa verrattuna täyteen kuormattuihin. Näin myös prosentuaalinen ero aikaisempaan tutkimukseen on pienempi, noin 11 %, mikä selittyy ajoneuvojen massojen erolla.

Aiemmin luoduissa malleissa on oletettu ajoneuvon kulkevan tarkasti nopeustaulukon mukaisesti. GPS-mittauksen epätarkkuudesta johtuen taulukko sisältää muutamia epärealistisen suuria kiihtyvyyksiä. Nämä kiihdytykset lisäävät tarvittavan energian määrää huomattavasti lyhyeen kestoonsa nähden. Asettamalla malliin vastaavat massat, joita on käytetty aikaisemmin, sekä syöttämällä moottorin tuottamaan rajoittamatonta momenttia saadaan vertailukelpoisempia tuloksia. Massalla 16 100 kg mallista saatava vetopyöräenergia on 31,8 kWh ja massalla 12 650 kg se on 25,2 kWh. Tällöin erot aikaisempiin laskelmiin ovat 3,7–3,9 kWh ja 2,9–3,1 kWh. Pienemmällä massalla ero ei muutu, mutta suuremmalla se pienenee 0,9 kWh.

Prosentuaalisesti suurempi ero näillä arvoilla on noin 11 %, eli vastaa pienemmällä massalla syntyvää eroa. Prosentuaalisen eron täsmätessä eri massoilla voidaan mallin todeta toimivan johdonmukaisesti. Kaikki kyseessä olevat laskennat ovat simulaatioita, joilla saadaan arvioita todellisesta. Näiden tulosten perusteella ajoneuvon todellinen vetopyöräenergia olisi jotain GT-Suite -simulaatioiden ja aikaisempien laskentojen väliltä.

Mallin mukaan kuljettu matka kilometreinä

Ajoneuvo saatiin kulkemaan kaikilla massoilla hyvin haluttua nopeutta. Suurin poikkeama saatiin täysin kuormatulla linja-autolla tapauksella 2, jolloin mallin mukaan kuljetumatka oli 796,64 m vähemmän kuin todellinen (25 684 m). Pienin poikkeama saatiin 9 900 kg:n massalla tapauksessa 3, jolloin poikkeama oli 0,6 m. Prosentuaalisesti poikkeamat todelliseen matkaan nähden olivat siis 0,0-3,1 %. Poikkeamien perusteella voidaan todeta, ettei sähköbussi pysty kulkemaan täysin kuormattuna käytetyn nopeuskäyrän mukaisesti. Pienemmillä kuormilla ongelmaa ei esiinny.

Ajoaika sekunteina

GPS-mittauksella bussin perässä ajaen mitattu tapauksen 1 ja siitä muokattujen tapausten 2-4 ajoaika on 4171 s. Tapauksen 5 nopeustiedot on otettu linja-auton omasta tiedonkeruujärjestelmästä ja sen kesto on 3690 s. Tapauksella 5 laskettuja tuloksia tarkasteltaessa tulee huomioida aikaero.

Keskinopeus kilometreinä tunnissa

Ajoneuvon keskinopeuden tulisi olla tapauksissa 1-4 noin 22,2 km/h ja tapauksessa 5 noin 23,3 km/h. Nopeus tapauksissa 1-4 vaihtelee 21,5–22,2 km/h välillä, tapauksessa 5 nopeus vaihtelee 23,3–23,1 km/h. Mallin nopeudet vastaavat hyvin todellisia arvoja.

Maksimi kiihtyvyys m/s^2

Kiihtyvyyden tarkkailua käytettiin mallia tehdessä tarkistuslaskuissa. Nopeasti laskettavan tapauksen avulla pystyttiin toteamaan helposti, kiihtyykö linja-auto halutusti ja näin mahdollisiin puuttumaan epäkohtiin. Lopullisen mallin kiihtyvyydet olivat massoilla 9 900 kg $1,5 m/s^2$, 12 950 kg $1,1 m/s^2$ ja 16 000 kg $0,9 m/s^2$. Maksimikiihtyvyydet ovat realistisia linja-autolle.

Simulointiohjelman soveltuvuus tutkimus- ja opetuskäyttöön

Ohjelman käytön itseopettelu täysin alusta ja vailla laajempaa kokemusta vastaavien ohjelmien toiminnasta on työlästä. Työn edetessä ohjelman käyttöön muodostui rutiini ja näin erilaisten simulaatiotilanteiden luominen onnistui hyvinkin nopeasti. Siirtyminen myös ohjelman muihin osa-alueisiin, kuten termodynamiikkaan tai hydraulikkaan, on varmasti helpompaa tämän opinnäytetyön kokemuksen pohjalta.

Kokemattoman ohjelman käyttäjän olisi hyvä tehdä malliinsa vain pieniä muutoksia kerralla ja suorittaa näiden jälkeen välilaskenta mallin toiminnan varmistamiseksi. Kerralla

tehtävät laajat muutoksen ilman ohjelman ja mallin toiminnan syvempää ymmärrystä johtavat helposti vikailmoitusten sumaan, jonka selvittäminen on työlästä. Laajemmissa vikatilanteissa parempi ratkaisu on palata mallin luomisessa taaksepäin siihen pisteeseen asti, missä laskennan sai vielä toimimaan.

Ohjelman käytössä kannattaa hyödyntää laajaa esimerkkikokoonpanokirjastoa, josta löytyy yleensä suoraan oikeanlainen malli haluttuun tilanteeseen. Esimerkkejä on myös mahdollista lähteä muokkaamaan omia tarpeita vastaaviksi. Oman mallin luominen täysin tyhjästä on erittäin työlästä ja vaatii syvempää ohjelman ymmärtämistä.

Tässä opinnäytetyössä luodusta mallista on varmasti hyötyä Turun ammattikorkeakoulun jatkotutkimuksissa liittyen Turun joukkoliikenteeseen tuleviin sähkölinja-autoihin. Malliin voi tällä hetkellä syöttää uusien reittien nopeustietoja ja tutkia ajoneuvon soveltuvuutta reitille energiankulutuksen näkökulmasta. Mallia käytettäessä on kuitenkin muistettava, että tuloksiin sisältyy virhemarginaali johtuen mallin osittain puutteellisista lähtötiedoista.

Koululla voitaisiin alkaa järjestää ohjelmaan liittyviä kursseja. Kursseilla voisi esitellä ohjelman eri käyttömahdollisuuksia ja luoda ohjatusti malleja sekä suorittaa laskentoja. Loppukokeessa opiskelijoille voisi antaa lähtöarvot ja antaa heidän valita ohjelmasta oikeanlainen esimerkkimalli, syöttää annetut arvot malliin ja suorittaa laskenta. Kurssin järjestäminen olisi perusteltavissa, sillä ohjelmalla on käyttäjiä ympäri maailmaa eri ajoneuvo ja ajoneuvo-osavalmistajien keskuudessa. Ohjelmaa käyttäviä yrityksiä ovat esimerkiksi: Wärtsilä, Bosch, BMW, Mercedes Benz ja Toyota. (GT-SUITE 2017).

6. LOPUKSI

Luotu malli saatiin toimimaan, lähtötietojen puutteellisuus huomioon ottaen, hyvin. Ajoneuvo pystyi ajamaan kaikilla tapauksilla reitin loppuun asti. Akun loppuvaraus vaihteli massoista ja tapauksista riippuen 67,9 % ja 45,7 % välillä, todellisen datan kertoessa vaihteluvälin oleva 60–56,5 %. Mallissa testatut ääriolosuhteet selittävät sen varauksen vaihteluvälin suuruuden. Osa mallin antamista tuloksista osui todellisen vaihteluvälin sisään.

Vetopyöräenergioita vertailemalla oli tarkoitus varmistaa mallin toimivuus. Niitä verrattiin Turun AMK:n aiemmin tekemien laskelmien tuloksiin. Mallin antamat vetopyöräenergiat, massojen täsmätessä, olivat 11 % pienemmän kuin vertailukohteessa. Ero vetopyöräenergioiden välillä ei lähtötiedot ja yleistyksen huomioon ottaen ollut kovin suuri.

Ohjelman antamien tuloksien tarkastelussa oli ensin määritettävä, mitä ne tarkalleen tarkoittavat. Muutamilla apulaskuilla, joissa käytettiin esimerkiksi akun jännitettä sen joka varaustasolla, saatiin varmistettua monitulkintaiset vastauksen kuvaukset. Akun kohdalla ilmoitettu *depleted or added energy* tarkoitti akulta moottorille lähtevää ulkoista energiaa, josta oli jo poistettu akun sisäiset häviöt. Haastavuutta akun tuloksien tarkasteluun toi sitä lataava jarrutus. Tällaisten ohjelman antamien vastausten takia oli tehtävä Excel-taulukko jolla määriteltiin halutut energia-arvot.

Mallia olisi voinut vielä parantaa vetopyörästä hyötysuhteen, ajoneuvon otsapinta-alan ja jarrumomenttien osalta. Simulaatiossa käytettiin vetopyörästä hyötysuhteenä 100 %. Tällainen voimansiirron hyötysuhde on epärealistinen, sillä vetopyörästä olevat hammaspyörät aiheuttavat voimaa siirtäessään häviöitä. Hyötysuhteeksi olisi voitu arvioida 95 %. Tulokset olisivat muuttuneet kokonaisenergiankulutuksen osalta noin 5,3 % suuremmiksi. Vertailuarvona olleen vetopyöräenergian ero nyt ja aiemmin saatujen tulosten välillä olisi muutoksesta huolimatta 11 %. Voimansiirron hyötysuhde ei vaikuta tarvittavan vetopyöräenergian suuruuteen.

Ajoneuvon otsapinta-alaa olisi voinut pienentää maavaran verran. Jos oletetaan, että maavara on jonkin verran pienempi kuin renkaan säde eli 0,30 m, ja renkaiden väliin jää vapaata leveyttä auton leveys, josta vähennetään 2 x renkaiden leveys (joka on n. 290 mm, kun rengaskoon mukainen kulutuspinnan leveys on 285 mm), saadaan poistettavaksi alueeksi 0.585 m^2 . Jäljelle jäisi 8.1 m^2 , joka on 6,9 %:n vähennys.

Jos laskenta tehtäisiin tällä arvolla, tulokset pienenisivät selvästi tätä vähemmän, koska kokonaisvastuksista kiihdytykset ja vierintävastus kattavat noin 95 % ja ilmanvastuksen osuus on noin 5 %. Jos tähän tulee 7 %:n vähennys, vähennys esimerkiksi vetopyörä-energiaan olisi vain 0.35 %.

Kokonaisjarrumomenttia olisi voinut korottaa noin 10 kNm, jolloin päästäisiin katsastusmääräykset täyttävään 5 m/s^2 hidastuvuuteen. Simulaatiossa käytetyillä nopeustiedoilla ei kuitenkaan ollut tarvetta saavuttaa niin suuria hidastuvuuksia, joten tällä ei ollut vaikutusta kyseisen simulaatio lopputuloksiin. Suurempia hidastuvuuksia sisältäviä nopeustietoja käytettäessä olisi jarrumomentin kasvattamisella merkitystä.

Mitään ylläolevista korjauksista ei tehty malliin, sillä ohjelman lisenssi vanhentui ennen näiden epäkohtien tiedostamista. Todennäköisesti ohjelma antaisi pohdinnan mukaisia tuloksia. Tämä olisi kuitenkin mielenkiintoista varmistaa. Varmistusta ei kuitenkaan tehdä tämän opinnäytetyön puitteissa.

Ohjelman käytölle Turun ammattikorkeakoulussa on nyt luotu pohja. Käyttäjäkokesiäni perusteella se soveltuu koulullemme sekä tutkimus- että opetuskäyttöön. Koin opinnäytetyön mieluisaksi sen haastavuuden takia. Ohjelman toimintaa on varmasti huomattavasti helpompi päästä sisälle, jos sitä opetetaan luentomuotoisesti sisältäen teoriaosuuksia ja esimerkkitehtävien läpikäyntiä.

7. YHTEENVETO

Opinnäytetyö oli osa Turun kaupungin toimeksiantoa Turun ammattikorkeakoululle. Koulun on tarkoitus toimia bussilinjan 1 sähköistämisen ulkopuolisena teknisenä tukena ja raportoida saaduista tuloksista sekä kaupungille, että sähköbussien valmistajalle Linkker Oy:lle. Opinnäytetyössä tutkittiin GT-Suite -ajoneuvosimulointiohjelman toimivuutta ja soveltuvuutta työkaluksi Turun ammattikorkeakoulun käyttöön kyseiseen toimeksiantoon ja tulevaisuutta ajatellen.

Mallin luomisessa käytettiin yhtä useista ohjelman kirjastosta löytyvistä esimerkkimalleista, jossa oli valmis kokoonpano. Malliin syötettiin saatavilla olleet tekniset tiedot. Tietojen puutteellisuudesta johtuen osa niistä jouduttiin arvioimaan yleistä käsitystä käyttäen. Arviointi lisäsi mallin virhemarginaalia.

Mallissa käytetyt reittitiedot oli mitattu etukäteen tiedonkeruulaitteistolla. Reittitiedot olivat käytössä nopeus-aika Excel-taulukkona. Taulukko kopioitiin simulointimalliin. syötettyjen tietojen pohjalta suoritettiin ohjelman avulla laskenta.

Laskennan antamat tulokset olivat loogisia. Nyt saadut vetopyöräenergiat olivat 11 % pienemmät kuin aikaisemmin. Aiemmin suoritettujen laskujen tulokset eivät ole eksakteja, joten simulaatiolaskennan antamien tulosten suuruusluokka voidaan todeta oikeaksi.

LÄHTEET

FÖLI 2016. Linjan 1 Reitti. Viitattu 20.12.2016 <http://www.foli.fi/node/%20531/>

FÖLI 2017. Föli kartta. Viitattu 31.1.2017 <http://opaskartta.turku.fi/IMS/?layers=Opaskartta&lon=Kaikki%20linjat&lon=Pys%C3%A4kit&cp=6713248,23467104&z=64>

Gamma Technologies 2017a. Supported Platforms and Hardware Requirements & Recommendations. viitattu 21.3.2017 https://www.gtisoft.com/wp-content/uploads/2016/10/v2017_supported_platforms_and_hardware.pdf

Gamma Technologies 2017b. GT-SUITE – A Revolutionary MBSE Tool. Viitattu 5.1.2017 <https://www.gtisoft.com/>

Gamma Technologies 2017c. GT-ISE (Integrated Simulation Environment). Viitattu 5.1.2017 <https://www.gtisoft.com/gt-suite/productivity-tools/gt-ise-integrated-simulation-environment/>

Gamma Technologies 2017d. GT-POST. Viitattu 5.1.2017 <https://www.gtisoft.com/gt-suite/productivity-tools/gt-post/>

Linkker 2016. Kuljettajakoulutusmateriaali, 20.10.2016

Reif ym. 2014. Reif K.; Dietsche, K-H. & noin 200 muuta kirjottaja teollisuudesta ja yliopistoista. Bosch Automotive Handbook 9th edition. Karlsruhe: Robert Bosch GmbH

Tulokset massalla 9 900 kg

9 900 kg	Case 1	2	3	4	5
Akun varaus lopussa %	46,01	46,06	55,7	55,72	53,29
Akulta lähtevä ulkoinen energia <i>kWh</i>	17,58	17,56	13,04	13,02	13,95
Sisäisen resistanssin aiheuttama häviö <i>kWh</i>	0,97	0,97	0,37	0,37	0,74
Kulutettu ulkoinen energia <i>kWh</i>	18,55	18,53	13,41	13,39	14,69
Ladattu sisäinen energia <i>kWh</i>	5,62	5,62	2,17	2,18	4,01
Kokonaisenergiankulutus <i>kWh</i>	24,17	24,15	15,58	15,57	18,7
Moottorin häviöt <i>kWh</i>	6,12	6,11	3,41	3,41	4,73
Vetopyöräenergia <i>kWh</i>	17,08	17,07	11,8	11,79	13,23
Kuljettu matka <i>m</i>	25676	25566	25683	25633	23884
Ajoaika <i>s</i>	4171	4171	4171	4171	3690
Keskinopeus <i>km/h</i>	22,16	22,07	22,17	22,12	23,3
Maksimi kiihtyvyys m/s^2	1,49	1,49	1,49	1,49	1,49
Matkan poikkeama <i>m</i>	8,02	118,2	0,62	51,3	116,5

Tulokset massalla 12 950 kg

12 950 kg	Case 1	2	3	4	5
Akun varaus lopussa %	31,7	31,76	47,75	47,78	43,13
Akulta lähtevä ulkoinen energia <i>kWh</i>	23,92	23,88	16,98	16,96	18,65
sisäisen resistanssin aiheuttama häviö <i>kWh</i>	2,03	2,04	0,65	0,66	1,41
Kulutettu ulkoinen energia <i>kWh</i>	25,95	25,92	17,63	17,62	20,06
Ladattu sisäinen energia <i>kWh</i>	6,61	6,62	2,41	2,4	4,63
Kokonaisenergiankulutus <i>kWh</i>	32,56	32,54	20,04	20,02	24,69
Moottorin häviöt <i>kWh</i>	5,35	5,34	3,9	3,9	4,27
Vetopyöräenergia <i>kWh</i>	25,18	25,16	15,49	15,46	19,01
Kuljettu matka <i>m</i>	25560	25414	25648	25585	23860
Ajoaika <i>s</i>	4171	4171	4171	4171	3690
Keskinopeus <i>km/h</i>	22,06	21,94	22,14	22,08	23,28
Maksimi kiihtyvyys m/s^2	1,14	1,14	1,14	1,14	1,14
Matkan poikkeama <i>m</i>	124,1	269,7	35,57	99,03	140,1

Tulokset massalla 16 000 kg

16 000 kg	Case 1	2	3	4	5
Akun varaus lopussa %	11,45	11,59	39,22	39,31	31,31
Akulta lähtevä ulkoinen energia <i>kWh</i>	30,57	30,46	20,99	20,94	23,55
Sisäisen resistanssin aiheuttama häviö <i>kWh</i>	5,49	5,54	1,1	1,11	2,59
Kulutettu ulkoinen energia <i>kWh</i>	36,06	36	22,09	22,05	26,14
Ladattu sisäinen energia <i>kWh</i>	6,98	6,96	2,56	2,55	5,89
Kokonaisenergiankulutus <i>kWh</i>	43,04	42,96	24,65	24,6	32,03
Moottorin häviöt <i>kWh</i>	6,69	6,69	4,58	4,58	5,25
Vetopyöräenergia <i>kWh</i>	30,86	30,73	18,97	18,91	24,19
Kuljettu matka <i>m</i>	25139	24887	25504	25402	23676
Ajoaika <i>s</i>	4171	4171	4171	4171	3690
Keskinopeus <i>km/h</i>	21,7	21,48	22,01	21,92	23,1
Maksimi kiihtyvyys m/s^2	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92
Matkan poikkeama <i>m</i>	545,0	796,6	180,3	281,5	324,5

Tapausten (case) selvennys

DL 2 tiedonkeruulaitteistosta tuotu Excel-data kaikki pysähdykset	Case 1
DL 2 tiedonkeruulaitteistosta tuotu Excel-data kaikki pysähdykset, suodatettu	Case 2
DL 2 tiedonkeruulaitteistosta tuotu Excel-data joka toinen pysähdys	Case 3
DL 2 tiedonkeruulaitteistosta tuotu Excel-data joka toinen pysähdys, suodatettu	Case 4
Ajoneuvon tiedonkeruujärjestelmästä saatu Excel-data	Case 5
Akun varaus alussa	80 %
Reitin todellinen pituus m Case 1-4	25 684
Reitin todellinen pituus m Case 5	24 000