

TARTU ÜLIKOOL
GEOGRAAFIA INSTITUUT

Ivar Ansper

**Tuuleparameetrite hindamine erinevate HIRLAM-
mudeli versioonidega Eesti rannikualadel ja saartel**

Magistritöö

Juhendajad: prof. Rein Rõõm
dots. Jaak Jaagus

Tartu 2004

Sisukord

Sissejuhatus.....	4
1. Ülevaade atmosfääridünaamika mudelitest	6
1.1. Ajalooline taust.....	6
1.2. Ilmaennustusmudelite klassifikatsioon.....	7
1.3. Atmosfääridünaamika võrrandid	8
1.4. Atmosfääridünaamika võrrandite diskretiseerimine.....	9
1.5. Peamised numbrilised meetodid.....	10
1.5.1 Ilmutatud Euleri skeem	10
1.5.2 Ilmutamata Euleri skeem.....	12
1.5.3 Pool-ilmutamata lähendus	12
1.5.4 Spektraalmeetod	13
1.5.5 Pool-Langrange'i skeem.....	13
1.5.6 Lõplike elementide meetod	14
1.5.7 Vertikaalsed aspektid	14
1.5.8 Ääritingimused	14
1.6. Mittehüdrostaatiline dünaamika	15
1.7. Võrguruudu siseste protsesside parametrizeerimine.....	17
1.7.1 Päikesekiirgus	17
1.7.2 Aluspinna protsessid ja taimkatte mõju	17
1.7.3 Maapinnalähedane kiht ja turbulentsus	18
1.7.4 Konvektsioon	18
1.7.5 Soojus- ja niiskusvahetus	19
1.8. Andmete assimilatsioon.....	20
1.8.1 Vaatlused, taustväli ja statistiline informatsioon	20
1.8.2 Andmete assimilatsiooni meetodid	21
1.8.3 Andmehõive ja selle tähtsus.....	21
2. HIRLAM.....	23
2.1. Mudeli dünaamika	23
2.2. Mudeli füüsika ja järeltöötlus	24
2.3. Analüüs ja initsialiseerimine	25
2.4. HIRLAM tehniline pool	26
3. Töös kasutatavad andmed ja metoodika	27
3.1. Vaatlused	27
3.2. Rakendatud mudelversioonide H11 ja MH3 kirjeldus	28
3.3. Metoodika.....	30
4. Tulemuste analüüs	33
4.1. Mudelite tuulekiiruse prognooside hindamine	33
4.2. Mudelite tuulesuuna prognooside hindamine.....	40
4.3. Tuulekiiruse süstemaatiline ja ruutkeskmise viga erineva suunajaotuse korral...	46
4.3.1 Kihnu.....	46

4.3.2 Kunda	48
4.3.3 Pärnu	49
4.3.4 Ristna.....	50
4.3.5 Sõrve	51
4.3.6 Vilsandi	52
4.3.7 Kålbadagrund	53
4.4. H11 ja MH3 vahelised erinevused.....	55
Kokkuvõte.....	57
Kasutatud kirjandus	59
Summary	62
LISAD.....	64

Sissejuhatus

Viimasel ajal on pidevalt kasvanud vajadus täpsema ja usaldusväärsema ilmaennustuse järele, kuna paljude inimeste tegevus on kaudselt või otseselt mõjutatud etteantud ilmaprognoosist, millest lähtudes planeeritakse oma edasisi töid ja tegemisi. Mida lühema aja kohta soovitakse ilmaprognoosi saada, seda täpsemalt ja detailsemalt tahetakse teada, mis konkreetsemalt juhtuma hakkab. Et saada võimalikult head ennustust, on võrreldes varasemate ilmaennustusmeetoditega muutunud oluliselt kaasaegse ilmaennustamise iseloom ja meetodid.

Üheks olulisemaks ja kiiremini arenevaks suunaks lühiajalises ja keskmise ulatusega ilmaennustamises on kujunenud numbriline ilmaennustus, mis kasutades hüdrodünaamika võrrandeid arvutab järgmiste päevade ilma numbriliste meetodite abil. Ilmaennustusmodelite puhul eristatakse mudeleid, mis on mõeldud pikema, lühema ja väga lühikese ajaperioodi ilma ennustamiseks, kuna soovitud tulemusest sõltub konkreetse mudeli ülesehitus. Kui pikemate (kuni 2 nädalat) prognooside tegemiseks kasutatavates mudelites on rõhuasetus keskmiste prognoosiparameetrite hindamisel, et teada saada, mis pikema aja jooksul üldiselt juhtuma hakkab, siis lühema aja ilmaennustusmodelites on rõhk detailsusel: soovitakse täpsemalt teada, mis teatud ajal teatud kohas juhtuma hakkab.

Keskmise ulatusega prognooside puhul on parimaks ilmaennustusmodeliks kujunenud Euroopa Keskmise Pikkusega Prognooside Keskuse (EKPPK, *inglise keeles ECMWF – European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*) globaalmodell, mis ennustab ilma ette kuni 10-ks päevaks. Lühemal (kuni 5 päeva) ennustusel on kasutusel mitmeid piiratud ala mudeleid (e regionaalmudeleid), milledest käesolevas töös tuleb juttu mudelist HIRLAM. HIRLAM (*High Resolution Limited Area Model*) ehk Kõrge Lahutusega Piiratud Ala Mudeli ennustus ulatub 4-5 päevani (Unden et al, 2000). Et saada mingi geograafilise punkti kohta väga täpset ja detailset ilmaprognoosi, tuleb mudelites minna samm edasi, võttes kasutusele mittehüdrostaatilise (MH) dünaamika. MH mudelite erinevus eelnevate ehk hüdrostaatiliste (HS) mudelite ees tuleneb eelkõige väga suure lahutuse kasutamisest, mille tõttu ei saa mudelites kasutada hüdrostaatilist lihtsustust – dünaamikavõrrandeist ei saa välja jätta vertikaalseid kiirendusi, mis on suurtel ruumilahutustel olulised konvektiivsete protsesside ja orograafiast tingitud vertikaalsete liikumiste kirjeldamisel. Samuti nõuavad MH mudelid võrreldes HS mudelitega palju detailsemat kliimaandmebaasi.

2002 aastal sõlmiti EMHI (Eesti Meteoroloogia ja Hüdroloogia Instituut), TÜ (Tartu Ülikool) ja FMI (Soome Meteoroloogia Instituut, *inglise keeles Finnish Meteorological Institute*) vahel koostööleping „Eksperimentaalse Kvaasioperatiivse Mittehüdrostaatilise HIRLAM arendamiseks EMHI-s“, mille peamised eesmärgid on:

- numbrilise ilmaennustuse arendamine ja vastava töögrupi loomine EMHI-s;
- kvaasioperatiivselt töötava kõrge lahutusega MH dünaamikaga mudeli väljatöötamine ja tema tulemuste hindamine;
- meteoroloogilise hariduse populariseerimine ja edendamine atmosfääri-dünaamika modelleerimise ning ilmaennustamise valdkonnas Tartu Ülikoolis.

Käesolevat tööd võib käsitleda antud koostöölepingu ühe tulemusena, mis püüab kajastada ja hinnata antud projekti algperioodil saadud tulemusi. Töö teemaks on võetud numbrilise ilmaennustusmodeli HIRLAM erineva lahutusega HS ja MH versiooni

tuuleparameetrite hindamine Eesti rannikualadel ja saartel. Eesmärgiks on peamiste erinevuste väljatoomine 2 erineva mudeli vahel, samuti võimalike vigade ja nende põhjuste väljaselgitamine. Antud tulemuste põhjal peaks olema näha kas lahutuse suurendamine ja mittehüdrostaatilise dünaamika kasutamine teeb lühikesed prognoosid täpsemaks ja detailsemaks.

Magistritöö peamised ülesanded on:

- anda ülevaade numbrilistest mudelitest ja piiratud ala numbrilisest ilmaennustusmudelitest HIRLAM;
- erineva lahutuse ja dünaamikaga HIRLAM versioonide iseseisev käitamine väljundandmete saamiseks;
- erineva lahutuse ja dünaamikaga versioonide ennustuste võrdlemine vaatlusandmetega ning prognoositavate meretuulte hindamine Eesti rannikualadel ja saartel;
- mudeli versioonide võrdlemine omavahel, peamiste erinevuste ja nende võimalike põhjuste väljatoomine;
- eeltööde tegemine ja kogemuste omandamine HIRLAM rakendamiseks EMHI-s.

Töö tegemiseks on välja valitud 10-päevane periood novembri lõpust detsembri alguseni (27.11.1999 – 06.12.1999), kus esinesid hilissügiselt eeltalvele üleminekuperioodi vahelduvad ilmastikutingimused. Antud perioodi on käitatud kahe erineva lahutuse ja dünaamikaga (HS ja MH) mudeli versiooniga. Erinevateks lahutusteks oli kõrge lahutus (horisontaalne võrgusamm 11 km) ja väga kõrge lahutus (võrgusamm 3.3 km). Modelleerimisel saadud ennustustulemusi võrreldi tegelike vaatlusandmetega. Vaatlusjaamadest kasutati kuut Eesti rannikul ja saarel paiknevat vaatlusjaama: Kihnu, Pärnu, Sõrve, Vilsandi, Ristna ja Kunda ning Soome avameretorni: Kålbådagrundi tuuleandmeid. Lõpuks võrreldi mõlema mudeliversiooni käitamisest saadud tulemusi omavahel.

Mudeleksperimentide käitamisel kasutati algselt Tartu Observatooriumi 8-st protsessorist koosnevat klasterarvutit, hiljem EMHI-s tööle pandud 12-st protsessorist klastrit. Andmete võrdlemisel ja graafilisel väljatoomisel kasutati peamiselt vabataarkvara GRADS ja Microsoft Excelit.

1. Ülevaade atmosfääridünaamika mudelitest

Numbriline ilmaennustamine on otseses tähenduses järgnevate päevade ilma väljaarvutamine tänaste ilmaandmete ja varasemate kliimaandmete põhjal. Selleks vajatakse vastavaid ilmaseisu väljendavaid andmeid nagu temperatuur, õhurõhk, tuulekiirus ja –suund, õhuniiskus ning pilvevee hulk, mis viiakse vastavatesse arvutusvõrranditesse. Juhul kui tegemist on piiratud ala mudeliga, läheb algandmete kõrval tarvis ka ääritingimusi ala külgedel. Sõltuvalt sellest kui pika aja peale soovitakse ennustust teha, tuleb vastavalt ajaintervalli suurendada, mistõttu kasvab oluliselt arvutuste maht. Samuti kasvatab arvutuste mahtu kõrgema lahutuse kasutamine. Juba ühes kindlas punktis koosneb ilmaennustuse tegemine väga paljudest eeldustest ja arvutustest, mille käsitsi tegemine võtab väga palju aega.

Tänapäeval kasutatakse lühi- ja keskulatusega ilmaennustuse tegemiseks ilmaennustusmudeleid, mis kujutavad endast võimsal riistvaral baseeruvaid arvutusprogramme. Numbrilised prognoosimudelid koosnevad kahest peamisest osast analüüsist ja prognoosist, millest analüüsi ülesandeks on anda võimalikult täpne algse ilmasituatsiooni kirjeldus ning prognoosi ülesandeks tulevase ilma ennustamine tehtud analüüsist lähtudes. Järgnevates peatükkides on lähemalt kirjeldatud numbriliste arvutusmudelite põhilisi komponente, sealhulgas dünaamikat, füüsikalist parametrizeerimist ja andmete assimilatsiooni. Eraldi on kirjeldatud ilmaennustusmudelit HIRLAM.

1.1. Ajalooline taust

Atmosfääris toimuvate liikumiste matemaatilise mudeli loomise idee tekkis 20. sajandi alguses. Esimesena sõnastas selle Wilhelm Bjerknes 1904. aastal kui alg- ja piiritingimuste probleemi osatulevistega diferentsiaalvõrrandite süsteemile (Savijärvi, 1994).

Esimese katse ilma numbriliselt ennustada tegi inglise teadlane Lewis Frey Richardson 1922 aastal (Holton, 1992). Ta näitas kuidas ruumis piiratud punktihulga juures kirjutada atmosfääri liikumist valitsevad võrrandid ligikaudselt algebraliste diferentsiaalvõrranditena erinevate väljamuutujate väärtuste jaoks. Andes väljamuutujatele algväärtused, saab muutusi arvutada algebraliste diferentsiaalvõrrandite lahendamisel numbriliselt. Lisades ajasammul Δt toimuvad muutused väljade algväärtustele, saame uued prognoositud väärtused võrgupunktides. Väljamuutujate uusi väärtusi saab sel juhul kasutada muutujate uuesti arvutamiseks, mida saab omakorda kasutada edasiseks ajas ekstrapoleerimiseks. Isegi lühikese ulatusega ilmaennustamise puhul üle väikse ala nõuab antud protseduur palju aritmeetilisi arvutusi. Kuna Richardson ei osanud ette näha digitaalsete arvutite arengut, siis oleks tema hinnangul tulnud tööle panna 64 000 inimest, et teha ilmaennustust terve maakera kohta. Hoolimata rohkest töökulust töötas Richardson välja algoritmi kahe võrgupunkti vahelise aluspinnarõhu tendentsi prognoosimiseks. Kahjuks olid tulemused väga kehvad, kuna ennustatud rõhumuutused olid suurusjärg suuremad vaadeldud väärtustest. Sel ajal arvati viga tulenevat eelkõige kehvadest algandmetest, eriti aga vertikaalsuunas tehtavate mõõtmiste puudumisest.

Ometi oli Richardsoni skeemis veel teisigi tõsisemaid probleeme, mis ei võimaldanud paremat ennustust.

Pärast Richardsoni luhtunud katset ei tegeldud numbrilise ennustamisega pikemat aega. Alles peale II Maailmasõda hakati numbrilise ilmaennustamise vastu taas huvi tundma. Üheks põhjuseks oli meteoroloogilise vaatlusvõrgu loomine, kust saadi oluliselt rohkem algandmeid kui varem. Teiseks veelgi olulisemaks põhjuseks oli digitaalsete arvutite areng, mis võimaldasid hulgaliselt rohkem arvutusi läbi viia, kui seda suutnuks teha inimene. Ka saadi aru, et Richardsoni poolt loodud numbrilist skeemi saab olulisel määral lihtsustada, kuna seal oli aeglaselt liikuvate meteoroloogiliste lainete kõrval esitatud ka kiired kõrgsageduslikud heli- ja gravitatsioonilised e. ujuvuslained. Need lained aga tekitasid lahenduses palju müra, mistõttu polnud võimalik saada õiget arengut. 1948 a. näitas ameerika teadlane Jule Charney (Holton, 1992) kuidas lihtsustada dünaamilisi võrrandeid geostroofilise ja hüdrostaatilise lähenduse kaudu, filtreerides välja heli- ja ujuvuslained. Tulemuseks saadi nn. kvaasi-geostroofiline mudel, mille erijuhtu kasutati 1950 a. numbrilise ilmaennustuse tegemisel. Mudeliga saadi geopotentsiaali prognoosid 500 mb läheduses. Siiski ei ennustanud see mudel ilma tavalises mõttes, kuna ta arvutas vaid 500 mb geopotentsiaali ja tuuleväljade arengut, kuid seda said ilmaennustajad kasutada kohaliku ilma ennustamiseks. Hiljem andsid kvaasi-geostroofilised mitmetasemelised mudelid ka aluspinna rõhu ja temperatuurijaotuse ennustusi, kuid nende täpsus oli piiratud.

Nüüdseks on seoses arvutite arengu ja üha parema modelleerimistehnikaga jõutud mudeliteni, mis on üsna sarnased Richardsoni poolt kasutatud võrranditele, olles samas palju täpsemad kui kvaasigeostroofilised mudelid.

1.2. Ilmaennustusmudelite klassifikatsioon

Mudeli poolt pakutavaid prognoose saab jaotada nii kestuse kui ka geograafilise ulatuse järgi. Geograafilise ulatuse järgi jaotatakse ilmapudelid:

- üldtsirkulatsioonimudelid ehk kliimamudelid. Kliimamudelid hõlmavad terve maakera, võrgusammu pikkus on 50-400 km. Neid kasutatakse pika kestusega (üle kahe nädala) ilma- ja kliimaproгноoside tegemiseks;
- keskmise ennustusulatusega numbrilised ilmaennustusmudelid. Numbriliste prognoosimudelite võrgusammu pikkus on 20-100 km, ja ajaline samm on 2-15 minutit. Need mudelid hõlmavad terve maakera, ennustuse pikkus on kuni kaks nädalat;
- piiratud ala mudelid. Võrgusammu pikkus 10-50 km ja ajaline samm 1-5 minutit. Hõlmavad maksimaalselt kuni veerandi maakera pinnast, ennustuse pikkus kuni 5 päeva;
- mesomastaapsed e. mesomudelid. Võrgusammu pikkuseks on 1-20 km. Mesomastaapsed mudelid võimaldavad arvutada kohalikku ilma, samuti saab nende abil vaadelda mäestike mõju, äikesepilvede tekkimist jne. Prognoositava ala läbimõõt on 500 kuni 3000 km.

1.3. Atmosfääridünaamika võrrandid

Numbrilised ilmaennustusmodelid baseeruvad atmosfääri liikumist kirjeldavatel võrranditel. Füüsikalisest ja matemaatilisest vaatepunktist lähtudes valitsevad atmosfääri käitumist järgmised jäävusseadused, mis on antud juhul esitatud hübriidkoordinaatides ja toodud HS dünaamikamudeli jaoks (Unden et al, 2000):

- Horisontaalse liikumishulga jäävus (liikumishulga võrrandid);

$$\frac{dv}{dt} = [-fk \times v - \nabla \Phi - R_d T_v \nabla \ln p] + (P_u + K_u), \quad (1)$$

kus

v on kiiruse horisontaalne komponent;

t on aeg;

f on Coriolise parameeter;

k on vertikaalne ühikvektor;

p on rõhk;

T on temperatuur;

Φ on geopotentsiaal;

P ja K kirjeldavad füüsikalisi ja difusiooni protsesse.

- Energia jäävus (I termodünaamika seadus);

$$\frac{dT}{dt} = \left[\frac{\kappa T_v}{1 + (\delta - 1)q} \right] \left(\frac{\omega}{p} \right) + (P_T + K_T), \quad (2)$$

kus

ω on vertikaalne kiirus;

κ on von Karmani konstant;

q on õhuniiskus;

$\delta = \frac{c_{pv}}{c_{pd}}$, kus c_{pd} on kuiva õhu erisoojus (1004.64 J/KgK) ja c_{pv} on niiske

õhu erisoojus (1869.46 J/KgK);

T_v on virtuaalne temperatuur;

P ja K kirjeldavad vastavalt rakusiseseid füüsikalisi ja diffuuseid protsesse.

- Kuiva õhumassi jäävus (pidevuse võrrand);

$$\left(\frac{d_H}{dt} + D \right) \frac{\partial p}{\partial \eta} + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\dot{\eta} \frac{\partial p}{\partial \eta} \right) = 0, \quad (3)$$

kus

D on horisontaalse kiirusvälja divergents;

η on HIRLAM mudelis vertikaalne koordinaat;

p on rõhk;

d_H / dt tähistab materiaalse ajatuletise, horisontaalset komponenti:

$$\frac{d_H}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + v_x \frac{\partial}{\partial x} + v_y \frac{\partial}{\partial y}.$$

- Kõigis agregaatolekutes esineva niiskuse jäävusvõrrandid;

$$\left(\frac{dq}{dt}\right) = (P_q + K_q), \quad (4a)$$

$$\left(\frac{dm}{dt}\right) = (P_m + K_m), \quad (4b)$$

kus

q on õhuniiskus;

m on pilvevee segusuhe;

P ja K kirjeldavad füüsikalisi ja diffuuseid protsesse.

Need võrrandid moodustavad algvõrrandite süsteemi. Ilmaennustusmodelites tuuakse täiendavalt sisse rida lihtsustusi, milledest olulisim on hüdrostaatiline lähend:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial p} = -\frac{RT}{p}. \quad (5)$$

Hüdrostaatiline tasakaalu lähendus välistab vertikaalsuunalise kiirenduse. Seda lähendust kasutatakse enamasti madalama lahutusega modelites (horisontaalne võrgusamm suurem kui 10 km), kus vertikaalne kiirendus on teiste võrrandiparameetritega võrreldes olematu.

Arvestades tehtud lihtsustusi, nimetatakse kasutatavat dünaamikavõrrandite süsteemi primitiivvõrrandite süsteemiks. Nagu eespool toodud võrrandeist nähtub, antakse primitiivvõrrandid osatuletistega diferentsiaalvõrrandite süsteemina, mis kirjeldavad ajas muutuvaid väljasid kolmemõõtmelises koordinaadistikus. Tüüpilised väljaparaameetrid, mille dünaamikat modelid arvutavad on tuulevektor v , temperatuur T , õhurõhk p , suhteline õhuniiskus q ning pilvevee sisaldus m .

1.4. Atmosfääridünaamika võrrandite diskretiseerimine

Võrrandite numbrilise lahendamise eelduseks on nende diskretiseerimine ruumis ja ajas ehk võrrandite viimine lõplikele vahedele ruumis ja ajas. Modelleeritavale piirkonnale paigutatakse mõtteliselt kolmemõõtmeline võrgustik ning väljamuutujatele antakse võrgusõlmedes konkreetsed väärtused. Mida kaugemal võrgupunktid üksteisest asetsevad, seda ebatäpsemaks prognoos kujuneb. Teisalt nõuab tihedam võrgustik aga rohkem arvutamisaega ja suuremat arvutimälu.

Diskretiseerimine ajas kujutab mudeli parameetrite väljaarvutamist võrgustiku sõlmpunktides fikseeritud ajamomentidel. Kahe üksteisele järgneva ajamomendi vahet nimetatakse ajasammuks, mille pikkus määratakse tingimuste põhjal, mis piiravad vigade suurusjärku. Suurel määral sõltub ajasamm kasutatavatest numbrilistest meetoditest ehk nn. ajalistest integreerimismeetoditest.

Nii võrgu- kui ajasammu puhul on osa olulistest protsessidest mastaabilt liiga väikesed, et neid saaks dünaamiliselt käsitleda. Neid protsesse tuleb käsitleda parametrizeeritult. Parametrizeeritud protsesse kirjeldavad eespool toodud võrrandeis P ja K -liikmed, mis on sisuliselt ilmutatud dünaamika võrrandites allikad ja neelud.

Atmosfääri modelleerimine ja sellega kaasnevad veeauru aspektid viivad meid kokku globaalse probleemiga; kuna prognoositava aja pikendamine toob paratamatult kaasa ka vajaduse omada suuremat modelleeritavat piirkonda. Näiteks üksiku veeauru molekuli ringlusaeg atmosfääris on u. 10 päeva, mis võtab vähem aega kui õhumasside liikumine troopikaaladelt polaaraladele. Seega peavad numbrilised mudelid olema võimelised transportima õhumasse ja parandama nende karakteristikuid üle pikkade vahemaade pikkade ajaperioodide jooksul.

Üks olulisemaid veeauru liikumist mõjutavaid protsesse on atmosfääris tuuled. Seega on tähtis saada võimalikult täpseid tuulte hinnanguid atmosfääri dünaamiliste lähenduste kaudu. Lisaks peavad mudelid baseeruma ka täpsetel veeauru transporti käsitlevatel numbrilistel meetoditel. Veeauru on aga tema suure muutlikkuse tõttu erakordselt keeruline täpselt modelleerida. Veeauru hulk varieerub ekvaatorist poolusteni ning aluspinnalt tropopausini välja. Eriti raske on veeauru modelleerida polaaraladel, kus tema kogus on väga väike. Samas on aga polaaralad kliimasüsteemi seisukohalt lähtudes väga tähtsad. (Browning et al, 1999).

Enamik tänapäeval kasutusel olevad atmosfäärimudelid põhinevad sfäärilistel koordinaatidel (laius- ja pikkuskraad) ja numbrilistel lähendustel, mis arvestavad pikkus- ja laiuskraadi võrgustruktuuri. Sfäärilisel koordinaatsüsteemil on pooluspunktid, kuhu koordinaatjooned kokku jooksevad ja mille juures horisontaalse tuulevektori komponendid muutuvad mittedefineeritavateks. See nn. „pooluse probleem“ on toonud numbrilistele mudelitele hulgaliselt probleeme. Üheks „pooluse probleemi“ lahenduseks paljudest, mida ka numbrilistes mudelites sageli kasutatakse, on pooluspunktide nihutamine integreerimisalast kaugemale (pole võimalik kasutada globaaludelites). Teiseks võimaluseks on näiteks triangulaarse projektsiooni kasutamine, mistõttu kaob antud probleem ära. Sellist võimalust kasutatakse näiteks Saksa Ilmateenistuse poolt kasutatavates mudelites (*GME - Global-Modell*) (Jacobs, 2003).

1.5. Peamised numbrilised meetodid

Diskretiseeritud võrrandid lahendatakse arvutite abil diferentsvõrrandite numbrilise integreerimise meetodeid kasutades. Alljärgnevas on kirjeldatud enamlevinud numbrilise integreerimise meetodeid ja võtteid.

1.5.1 Ilmutatud Euleri skeem

Veeauru transporti võib kõige lihtsamal kujul kirjeldada ühemõõtmelise advekttsiooni võrrandiga (Browning et al, 1999):

$$\frac{\partial q}{\partial t} + U \frac{\partial q}{\partial x} = 0 \quad , \quad (6)$$

kus

$q(x,t)$ on transporditav eriniiskus;

x on sõltumatu ruumikoordinaat;

U on konstantne tuulekiirus;

t on aeg.

Kui eeldatakse, et U on konstantne, nihutatakse võrrandi lahendamisel algvälja $q(x,0)$ iga tulevase t korral allatuult kaugusele $U \cdot t$, $q(x,t)=q(x-U \cdot t,0)$. Niiskuprofiil liigub ühtlase kiirusega U piki x -telge, ilma et tema amplituud ja kuju seejuures muutuksid.

Võrrandile (6) vastav diferentsvõrrand on:

$$\frac{q_j^{n+1} - q_j^{n-1}}{2\Delta t} + U \frac{q_{j+1}^n - q_{j-1}^n}{2\Delta x} = 0, \quad (7)$$

kus

n tähistab ajasammu;

j tähistab ruumisammu;

$q_j^n = q(x_j, n\Delta t)$ on niiskuprofiil võrgusõlmedes $x_j = (j-1)\Delta x$ ajatasemel

$t^n = n\Delta t$, $n \geq 0$;

Δx on võrgupunkte eraldav intervall;

Δt on ajasamm.

Lähendust (7) nimetatakse tsentreeritud arvutuskeemiks.

Kuna lahend on defineeritud diskreetsel punktidel x_j , ei saa eristada väikseid struktuure, mille muutlikkuse ruumimastaap on lühem kui Δx .

Regulaarseid lainelisi struktuure kirjeldab siinuslaine (Savijärvi, 1994):

$$q(x,t) = Q \sin(kx - vt) \quad (8)$$

kus

Q – amplituud;

$k = \frac{2\pi}{L}$ – lainearv;

L – lainepikkus;

v – sagedus.

Tsentreeritud lähendusi (7) saab lineaarsel juhul lahendada analüütiliselt. Selle lahendamise põhjal saab näidata, et laineamplituud jääb oma algse ja õige väärtuse juurde: $|U \frac{\Delta t}{\Delta x}| \leq 1$. Juhul kui $|U \frac{\Delta t}{\Delta x}| > 1$, kasvab modelleeritud laine amplituud ajas

eksponentsiaalselt, mistõttu on tegemist arvutusliku ebastabiilsusega. Suurust $|U \frac{\Delta t}{\Delta x}|$

nimetatakse Courant arvuks ja tähistatakse $C = |U \frac{\Delta t}{\Delta x}|$.

Lahendades võrrandit (6) numbriliselt lähendusega (7), kirjeldatakse võrguintervalli Δx ja võrku x_j , mille baasil lahendus leitakse. Võrguintervall Δx tuleb valida küllaldaselt väike, nii et meid huvitavad nähtused oleksid lahendatavad lainepikkuste: $L \geq 2\Delta x$ juures. Kiirus U määratakse kui maksimaalne võimalik liikumiskiirus ning teda pole võimalik kontrollida. Ajasamm Δt tuleb valida nii, et ta rahuldaks Courant-Friedrich-Lewy (CFL) stabiilsustingimust:

$$\Delta t < \frac{\Delta x}{|U|}. \quad (9)$$

st. seda, et ajasamm peab olema väiksem, kui kuluks kõige suurema kiirusega U liikuvale osakesel ühest võrgupunktist teise jõudmiseks ehk võrgusammuga Δx võrdse vahemaa läbimiseks. Stabiilsustingimus (9) määrati lahenduse amplituudi poolt. Praktikas on tegelik ajasamm ilmutatud skeemi korral veelgi suurusjärgu väiksem (u. 3-4 korda väiksem), kuna lisaks materiaalsele voolamisele lisanduvad veel suure kiirusega ujulained, mis ei võimalda kasutada suuremat ajasammu.

Teine lahenduse tähtis karakteristik on lainete liikumiskiirus. Seda nn. faasikiirust saab samuti lahendada analüütiliselt lahenduse (7) juures, kus U võetakse konstantseks.

Lahendust (7) nimetatakse ilmutatud lahenduseks. Peamine omadus ilmutatud skeemides on see, et prognoos mingi võrgustikupunkti juures (q_j^{n+1}) sõltub ainult eelnevate ajasammude väärtustest.

1.5.2 Ilmutamata Euleri skeem

Järgmist lahenduste klassi esitatakse kui ilmutamata lahendusi. Siin on oluline just järgmise ajamomendi kasutamine. Seda klassi kirjeldatakse näiteks võrrandiga (Browning et al, 1999):

$$\frac{q_j^{n+1} - q_j^{n-1}}{2\Delta t} + \frac{U}{2} \left[\frac{q_{j+1}^{n+1} - q_{j-1}^{n+1}}{2\Delta x} + \frac{q_{j+1}^{n-1} - q_{j-1}^{n-1}}{2\Delta x} \right] = 0. \quad (10)$$

Antud võrrandit on keerukam lahendada kui eelnevaid, kuna iga q_j^{n+1} on juba ise tundmatu, olles veel ühenduses tundmatute naabritega ($q_{j-1}^{n+1}, q_{j+1}^{n+1}$). See võrrand on oma kujult siiski lihtne ja teda võib lahendada algebraliselt iteratsiooni meetodiga. Erinevalt lahendusest (7), mis vajab stabiilsete lahenduste saamiseks piirangut $|U \frac{\Delta t}{\Delta x}| \leq 1$, puuduvad võrrandi (10) puhul $U \frac{\Delta t}{\Delta x}$ juures piirangud ja skeem on stabiilne kõikide Δt valikute juures.

Ilmutamata skeemi stabiilsus saavutatakse lainete aeglustamisega, mistõttu skeem ei tööta efektiivselt kiirelt levivate lainete (ujulained) korral. Aeglastel advektiivsetel voolamiste korral töötab antud skeem võrreldes ilmutatud arvutusskeemiga tunduvalt paremini, võimaldades seejuures kasutada pikemat ajasammu.

1.5.3 Pool-ilmutamata lähendus

Võrrandid, mis valitsevad atmosfääri voogu, võimaldavad peale advektiooni kirjeldada ka teisi liikumistüüpe. Need sisaldavad inertsus- ja raskuslaineid, mis samuti omavad stabiilsustingimusi nagu CFL-tingimus (9) ilmutatud lahenduste jaoks, kusjuures advektiooni kiirus U asendatakse laine faasikiirusega. Ilmutamata skeemid on kasulikud mõnede atmosfäärimudelite võrrandite täiendavate komponentide jaoks.

Suuremõõtmelistes atmosfäärimudelites on raskuslainetega ühendatud kiired liikumised võrreldes advektiooni komponendiga väga väikesed, mistõttu prognoosi nad

märkimisväärselt ei mõjuta. Samas on need liikumised võrrandisüsteemides esitatud ja juhul kui ajasamm rikub stabiilsustingimust, kasvab iga väiksem häiritus piiramatult, rikkudes niimoodi kogu lahenduse. Kuna nad on prognoosi seisukohalt mitteolulised, võib neid kohelda ilmutamatutena. See võimaldab vähendada nende mõju ja ilma prognoosi rikkumata lubada kasutada pikemaid ajasamme. Sellist lähendust nimetatakse pool-ilmutamata skeemiks, kuna ainult neid võrrandiliikmeid, mis mõjutavad kiireid komponente, käsitletakse ilmutamatutena, kuid advektiivsed liikmed jäetakse ilmutatuks. (Browning et al, 1999).

1.5.4 Spektraalmeetod

Spektraalmeetodi kasutamisel esitatakse ennustatavad muutujad ühe ajasammu jooksul erinevates arvutuse staadiumites kord võrgupunkti väärtuste, kord lineaarselt sõltumatute spektraalfunktsioonide abil. Ühemõõtmelisel juhul kasutatakse Fourier ridu (Browning et al, 1999):

$$q(x_j, t) = \sum_{k=0}^K q_k(t) \sin(kx_j - \nu_k(t)). \quad (11)$$

Kahemõõtmelisel juhul leiavad kasutust sfäärilised harmoonikud, mis kujutavad endast ühekaupa väärtustatud pidevaid piiratud kompleksusega sfääriliste koordinaatide θ ja ϕ funktsioone. Neid kasutatakse, et kirjeldada mittesümmeetrilisi lahendusi sfäärilises sümmeetrias.

Kuigi spektraalmeetodil on palju häid omadusi ja ta näib olevat ideaalne sfääriliste piirkondade korral, on tal siiski ka puuduseid. Antud meetod on väliselt võrdne vähimruutude lähendusega ja ta minimeerib keskmise ruutvea üle globaalse piirkonna. See tähendab seda, et vea suurus on igal pool ühesugune. Selline olukord on tõsine probleem veeauru välja jaoks, mida tavaliselt käsitletakse atmosfäärimudelites segusuhtena. Segusuhe väärtus varieerub ekvatoriaalpiirkondade aluspinna lähedases kihis 20 g/kg kuni polaarpiirkondade aluspinna lähedases kihis 1 või vähem g/kg. 2 g/kg viga võib ekvatoriaalsetel aladel olla veel tühine, kuid selline viga polaaraladel muudab täielikult sealse välja iseloomu. Arvutusvigade tõttu võib segusuhe osutuda isegi negatiivseks, mis on aga füüsikaliselt võimatu. Peale selle võib viga viia tegelikest väärtustest märkimisväärselt suurematele väärtustele ja tekitada vale üleküllastumise, mis edaspidi tekitab olematut vihma.

1.5.5 Pool-Langrange'i skeem

Pool-Langrange'i meetodi kasutuselevõtmise põhjusteks oli eelkõige arvutusliku efektiivsuse tõstmine, kui ka vabanemine spektraalmeetodile omastest puudustest, mis tulenesid polaaralade sademete kirjeldamisel. Arvutusliku efektiivsuse juures peetakse silmas seda, et Pool-Langrange'i meetod võimaldab kasutada mitmeid kordi pikemat ajasammu sama või isegi parema täpsuse juures.

Pool-Langrange meetod põhineb dünaamikavõrrandite Langrange'i esitusel. Võrrandi (6) asemel baseeruvad lähendused võrrandipaaril (Browning et al, 1999):

$$\frac{dq}{dt} = 0, \quad (12)$$

$$\frac{dx}{dt} = U. \quad (13)$$

Võrrand (12) väidab, et q on piki trajektoori muutumatu (allika- ja neelukohtade puudumisel), trajektoor antakse aga võrrandiga (13). Iga punkti jaoks võetakse ligikaudne trajektoor, kuhu jõutakse kasutades tuulekiirust U . Skeem on stabiilne seni, kuni interpoleerimine baseerub võrgupunktidel, mis ümbritsevad lähtepunkti, ja skeemil ei esine ajasammu kitsendusi. Pool-Langrange skeemi on edukalt kombineeritud lõplikel vahemikel, spektraalsel ja lõplikul elemendil põhinevate lähendustega. (Browning et al, 1999).

1.5.6 Lõplike elementide meetod

Lõplike elementide meetod on põhimõtteliselt sarnane spektraalmeetodile. Nende kahe meetodi erinevus on selles, et spektraalmeetod kasutab globaalseid baasfunktsioone (st. funktsioone, mis on nullist erinevad kogu integreerimispiirkonnas), samas kui lõplike elementide meetod kasutab baasfunktsioone, mis on nullid kõikjal, välja arvatud piiratud aladel, kus nad on tükati lineaarsed või kõrgemat järku polünoomid. (Browning et al, 1999).

1.5.7 Vertikaalsed aspektid

Peale horisontaalsete aspektide tuleb atmosfääri mudelite numbrilistes lähendustes arvestada ka vertikaalse dimensiooniga. Vertikaalset dimensiooni on vaja mägede mõju hindamisel, kõrgemate atmosfäärikihtide kirjeldamisel ja veeauru segusuhte suure muutlikkuse vaatlemisel Maa aluspinna ja tropopausi vahel. Kõige enam kasutatakse numbrilistes mudelites vertikaalse koordinaadistikuna sigma-rõhu hübriidkoordinaate. Sigma-rõhu hübriidkoordinaadistik on kahest koordinaadistikust kokku pandud süsteem. Sigma väärtused saadakse antud kõrgusel rõhu väärtuste jagamisel aluspinnarõhu väärtustega ($\sigma = p/p_s$). Sigmakoordinaadistikku kasutatakse maapinna ja maapinna lähedaste õhukihtide kirjeldamisel, rõhukoordinaatidele minnakse sujuvalt üle kõrguse kasvuga.

1.5.8 Ääretingimused

Juhul kui mudeli integreerimisala ei hõlma tervet maakera, on vaja arvestada ka ääretingimustega. Enamasti saavad väiksema integreerimispiirkonnaga mudelid ääretingimused suurematest ehk globaalsetest mudelitest. Globaalmodelitest saadud äärevaljad kohandatakse väiksema mudeli võrku horisontaalse ja vertikaalse interpoleerimise teel. Samas võivad sellise interpoleerimise käigus tekkida kergesti ka mitmesugused vead.

1.6. Mittehüdrostaatiline dünaamika

Väikse horisontaalse mastaabiga liikumiste, väga ebaühtlase aluspinna ning tugevate konvektiivsete protsesside korral võib vertikaalne kiirendus olla nii suur, et teda ei saa võrranditest välja jätta, mistõttu liikumist ei saa enam vaadelda hüdrostaatilisena. Sel juhul räägitakse mittehüdrostaatilisest (MH) dünaamikast.

Anelastse MH võrrandid rõhukoordinaatides:

- Isobaarpinna kõrguse võrrand (Rõõm, 2001):

$$w = \frac{dz}{dt}, \quad (14)$$

kus

w on vertikaalne kiirus.

- Vertikaalne liikumisvõrrand:

$$\frac{dw}{dt} = g \left(1 + \frac{p}{H} \frac{\partial z}{\partial p} \right), \quad (15)$$

kus

g on raskuskiirendus;

p on rõhk;

H on atmosfäärikihi paksus;

z on kõrgus.

- Horisontaalne liikumisvõrrand:

$$\frac{dv}{dt} = -g \nabla_z - f \times v, \quad (16)$$

kus

v on horisontaalne kiirus;

f on Coriolise parameeter;

∇_z on isobaarpinna kõrguse gradient.

- Temperatuurivõrrand:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{RT\omega}{c_p p}, \quad (17)$$

kus

T on temperatuur;

R on universaalne gaasikonstant;

ω on vertikaalne kiirendus;

c_p on isobaariline erisoojus.

- Pidevusvõrrand:

$$\operatorname{div} v + \frac{\partial \omega}{\partial p} = 0. \quad (18)$$

- Alumise piirpinna evolutsioonivõrrand:

$$\frac{dp_0}{dt} = \omega(x, y, p_0, t), \quad (19)$$

kus

ω on rõhuruumis kasutatav vertikaalne kiirus;

p_0 on rõhk merepinna tasemel.

Ääritingimused on ülal $\omega|_0 = 0$ ja all $z[x, y, p_0(x, y, t), t] = h(x, y)$.

Mittehüdrostaatilise mudeli puhul eeldatakse, et akustilised lained on täielikult välja filtreeritud. Füüsikaliselt tähendab see lõpmatut häälekiiruse lähendust. Sisemise akustilise moodi filtreerimine saavutatakse mudeli võrranditest liikumise 3-mõõtmelise mittedivergentsuse (st. keskkonna kokkusurumatuse ehk anelastsuse) eeldamisel rõhukoordinaatides, mida kirjeldab pidevusevõrrand (18) (on hüdrostaatilise mudeliga sama).

Välise akustilise moodi filtreerimisel kasutatakse aluspinna rõhu kohastumise eeldust. See tähendab, et dünaamikas lähendatakse aluspinna rõhk etteantud mudelfunktsiooniga p_0 (mis praktikas võetakse suurema mudeli ääreväljadest), kusjuures vertikaalselt integreeritud horisontaalse tuule divergents rahuldab massibilansi tingimust.

Mittehüdrostaatilises atmosfääris sisaldab geopotentsiaal Φ hüdrostaatilist peakomponenti ja mittehüdrostaatilist lisa. Akustiliselt filtreeritud juhtumil on mõttekas esitada Φ terminise geopotentsiaali φ ja baarilise geopotentsiaali ϕ summana: $\Phi = \varphi + \phi$

Mittehüdrostaatilise modelleerimise lähendusel rõhukoordinaatides on mitmeid eeliseid. Peale üldise – et rõhukoordinaadid toetavad kõige üldisemat mittelihtsustatud dünaamikat – ei nõua antud lähendus taustvälja eelnevat eraldamist. Teiseks eeliseks on lihtsus, kuna eelduse kohaselt on liikumine rõhukoordinaatides solenoidaalne (mittedivergentne). Rõhukoordinaatides lähenduse praktiliseks eeliseks mittehüdrostaatilisel modelleerimisel on veel see, et ta võimaldab olemasoleva hüdrostaatilise HIRLAM-i vahetut üleviimist mittehüdrostaatilistesse mastaapidesse, seejuures ümber seadistades teisi numbrilisi pakette nagu initsialiseerimine, parametrizeerimine ja järeltöötlus. (Rõöm, 2001).

1.7. Võrguruudu siseste protsesside parametrizeerimine

Füüsikalise parametrizeerimise peamiseks ülesandeks on diabaatiliste efektide kirjeldamine atmosfäärimudelis. Väiksemastaabiliste nähtuste parametrizeerimine sõltub mudeli lahutusest, kuna lahutus määrab ära mudeli suutlikkuse vastavat nähtust kirjeldada. Peamisteks parametrizeeritavateks protsessideks on aluspinna protsessid, faasimuutused vee olekutes, sh pilvede tekkimine ja sademed, kiirgusvahetus ning atmosfääri turbulentsus.

1.7.1 Päikesekiirgus

Päikesekiirgus on see jõud, mis paneb atmosfääri liikuma. Sissetulev lühilaineline kiirgus neeldub ja peegeldub tagasi õhuosakestelt, pilvedelt ja maapinnalt. Maapind ja atmosfäär omakorda kiirgavad välja pikalainelist kiirgust. Päikesekiirguse soojuslik toime varieerub laiades piirides, sõltudes geograafilisest asukohast, aastaajast ja päevaajast.

Kiirgusprotsesside erinevused avalduvad väga kõrge lahutuse juures, kuna kiirgamine naaberpunktides võib mõjutada kohalikku soojenemist. Lisaks ei anna kohaliku pilvkatte vertikaaljaotus mõningates olukordades täpset informatsiooni päikesekiirguse arvutamiseks maapinnal. See tuleneb sellest, et viltused kiired võivad läbida erineva pilvhulgaga naabervõrgupunktid. Samuti võib kõrge lahutuse juures muutuda maapinna kalde tõttu oluliseks kohalik otsene päikesekiirgus, mis lahutuse suurenemisel kaudselt suurendab ruumilist päikese energiavoo muutlikkust maapinnal (Unden et al, 2002).

Kiirgusvahetuse parametrizeerimine mõjutab soojusbilanssi, kirjeldades selle abil päikesekiirguse mõju ilmastikule. Mudeli seisukohast on kiirgus oluline temperatuuri reguleerija, mida ta mõjutab otseselt läbi diabaatilise soojenemise või jahtumise.

1.7.2 Aluspinna protsessid ja taimkatte mõju

Aluspinna parametrizeerimine kirjeldab lihtsate võrranditega aluspinnatemperatuuri muutumist, mullaniiskust ja lumikatet. Mullatemperatuuri mõjutavad aluspinna kiirgusbilanss, tajutav ja varjatud soojusvoog. Mullaniiskus muutub auramise, lumesulamise ja sademete tulemusena. Lisaks toimub pinnases erinevate kihtide vaheline soojuse ja vee ülekanne vastavalt nende suuruste gradientidele.

Kui muld on niiske või tegemist on vegetatsiooniga, on aluspinna energiabilansis olulised auramisest ja transpiratsioonist tingitud varjatud soojusvood. Üks võtmesuurus, mis määrab ära varjatud soojusvoo koguse, on mulla niiskusesisaldus. Kui muld on kuiv, sulguvad taimede õhulõhed, et säilitada vett. Sellega kaasneb fotosünteesi aeglustumine või peatumine. Teisest küljest troopilises vihmametsas kantakse varjatud soojusvoo kaudu minema enamik kiirgusenergiast. Need protsessid nõuavad mudelis aluspinna hüdroloogilise bilansi arvestamist (Browning et al, 1999).

Aluspinna parametrizeerimisskeem kasutab ka merevee temperatuuri, jääkatte ulatuse ja lumikatte vaatlusandmeid. Samuti on vajalik võimalikult hästi kirjeldada maa- ja veepinna osakaalu. Maaga kaetud võrguruut jaotatakse taimkatteta ja taimkattega fraktsioonideks. Veega kaetud võrguruut jagatakse jääga kaetud ning jäävabaks piirkonnaks.

Lisaks lahutusvõime probleemile, ei ole osa protsesse küllaldaselt uuritud, et neid mudelis adekvaatselt parametrizeida. Üks sellistest protsessidest on näiteks transpiratsioon. Bioloogiast on teada, et juhul kui pinnases on vähe vett, püüavad taimed veeauru minimaalselt ära anda ja samas maksimaalselt neelata päikesevalgust fotosünteesiks. Et liita neid tingimusi matemaatilisse võrrandisse, tuleb arvestada taimkatte, mulla ja ilma seisundit, mis kokkuvõttes teeb parametrizeerimise väga keeruliseks.

1.7.3 Maapinnalähedane kiht ja turbulentsus

On hästi teada, et madalaim 10-20 m kõrgune atmosfäärikiht, mida nimetatakse ka maapinnalähedaseks kihiks, on oluline kiht liikumishulga dissipatsioonil (mehhaanilise energia muutmisel soojuseks sisehõõrde tulemusena) ning soojuse ja niiskuse transpordil maapinnalt atmosfääri. Tuule- ja temperatuuriprofiile kirjeldatakse selles väga turbulentses kihis võrranditega, mis sõltuvad aluspinna karedusest ja teistest parameetritest. Võrrandite saamisel kasutatakse Monin-Obukhovi hüpoteese. Viimastest järeldub, et liikumishulga- ja soojusvood on aluspinnakihi vertikaalses ulatuses peaaegu konstantsed. Neist lähtudes tuletatakse piirikihi väljadele nn universaalprofiilid, mida kasutatakse mudelites, et anda ülekandegurid kineetilise energia ja soojusvoogude arvutamiseks piirkihis.

Üheks olulisemaks ja keerukamaks parametrizeeritavaks protsessiks on turbulentne segunemine planetaarses piirkihis. Planetaarseks piirikihtiks nimetatakse atmosfäärikihti, mis on otseselt mõjutatud aluspinna poolt. Päeval ajal päikeseenergia mitte ainult ei soojenda maapinda vaid ka kutsub esile transpiratsiooni ja aurumise niiskelt mullapinnalt, transportides niiskust atmosfääri. Aluspinna soojenemine viib turbulentsele liikumisele, mis võib mastaabilt ulatuda mõnest meetrist mõnesaja meetrini.

1.7.4 Konvektsioon

Rünpilvede konvektsiooni võib käsitleda analoogiliselt turbulentsi käsitlusele. Kuna rünpilvede puhul on õhk võrguruudus küllastatud paiguti, siis võrguruudu sisemine sademetekäik ei tööta. Kui lisandub veel ülespoole liikumine, muutub mudeli atmosfäär absoluutselt ebastabiilseks (tõusvad õhuosakesed jätkavad tõusu kuni tropopausini) ning ta võib muutuda ka numbriliselt ebastabiilseks. Lähtudes arusaamast, et konvektsioon algab palju varem kui võrgus keskmistatud atmosfäär küllastub, on välja arendatud mitmed konvektsiooni parametrizeerimisskeemid. Neis skeemides määrab mudel ise, millal konvektsioon peaks tekkima. (Browning et al, 1999).

1.7.5 Soojus- ja niiskuvahetus

Kõikides atmosfääri tsirkulatsiooni mastaapides on väga oluliseks, kuid äärmiselt keerukaks protsessiks Maa aluspinna ja atmosfääri vaheline soojus- ja niiskuvahetus. Ookeani kohal võetakse merepinnatemperatuur (MPT, inglise keeles SST – *Sea Surface Temperature*) suhteliselt aeglase muutumise tõttu numbrilistes mudelites konstantseks. Operatiivkeskustes kasutatakse päevaseid SST-satelliidivaatlusi, et uuendada mudeli alumisi piiritingimusi. Üldiselt eeldatakse numbrilistes mudelites, et SST anomaalia jääb ajas konstantseks. See aga ei kajasta tegelikku olukorda, mistõttu peaksid ookeani tsirkulatsiooni mudelid andma SST-väärtused aluspinna kohta. Ka aluspinna soojusvoogude hindamise juures on oluline komponent merepinnaseisund. Lisaks atmosfääri muutujatele on vaja teada ookeanipinna laineenergiat.

Antud hetkel kasutab enamik numbrilisi ilmaennustusmudelid parametrizeerimismeetodit, mis viib efektiivse kareduse sõltuvusse aluspinnarõhuga. Koos maapinnalähedase kihi sarnasusprofiilidega saab kasutada suuremat osa aerodünaamilisi võrrandeid, et tuletada soojusvoogude avaldised.

Maismaa kohal on olukord keerukam. Päeval ajal soojendab päikesekiirgus kiiresti üles pealmise mullakihi ja taimelehtede pinnad. See päästab valla palju protsesse, mis eemaldavad liigset soojust. Maapind kiirgab pikalainelist kiirgust. Turbulentne õhuliikumine kannab tajutava soojuse maapinnalähedasse õhukihti, kust suuremastaapsed keerised kannavad soojuse edasi planetaarsesse piirikihti. Lõpuks kannavad atmosfääri tsirkulatsioonid soojuse ära. Esineda võib ka vastupidine soojusvoog, mille korral õhk soojendab aluspinda. (Browning et al, 1999).

1.8. Andmete assimilatsioon

Numbrilise ilmaennustuse jaoks vajatakse algtingimusi. Protsessi, mille käigus koostatakse prognoosi jaoks algtingimused, nimetatakse andmete assimilatsiooniks. Andmete assimilatsioon koosneb analüüsist ja initsialiseerimisest e algväärtustamisest. Analüüsi ülesandeks on vaatlusandmete kohandamine numbrilises mudelis kasutamiseks. Kohandamise käigus praagitakse välja vigased vaatlusandmed ja kantakse jaamade vaatlusandmed regulaarsele võrgule.

Initsialiseerimise käigus elimineeritakse mittesoovitavad ujulaineid, seades neid tekitavad algsed tendentsid nulliks.

Igapäevases operatiivses ennustustöös rakendatakse vaatlusandmete assimilatsiooni tsüklikena. Iga tsükli käigus valmistatakse uus analüüs, mis põhineb neljal olulisel osal (Daley, 1991):

- a) Vaatlusandmete kvaliteedikontroll;
- b) Objektiivne analüüs;
- c) Initsialiseerimine;
- d) Lühike prognoos, mille põhjal saab luua järgmise taustvälja.

1.8.1 Vaatlused, taustväli ja statistiline informatsioon

Optimaalne algseisund põhineb atmosfääri vaatlustel. Vaatlusandmete hulk, vaatluskohtade geograafiline paigutus ja mõõteriistade täpsus on viimasel aastakümnel oluliselt paranenud. Vaatluste puhul peab arvestama järgmiste asjaoludega (Browning et al, 1999):

1. vaatlused on ruumiliselt ebaregulaarsed, st. et nad paiknevad geograafiliselt ebahõltselt;
2. vaatlused on ajaliselt ebaregulaarsed, st, et nad tehakse erineval aegadel, mis ei ühti sünoptiliste tähtaegadega;
3. liiga väheste või puuduvate vaatlusandmete tõttu, tekib mudeli algseisundi loomisel määramatuse probleem;
4. vaatlusi tuleb kontrollida, mille käigus tuleb parandada või kõrvaldada ebatäpsed vaatlused;

Et luua väheste vaatluste põhjal täielik algseisund, on täiendavalt vaja sõltumatut informatsiooni antud atmosfääriseisundi kohta. Selleks valitakse taustväli, milleks võivad olla klimatoloogiline analüüs ("külm start") või varasem mudeli prognoos ("kuum start"). Et saada sobivaim eelhindang atmosfääri seisundi kohta, tuleks kasutada sama numbrilise ilmaennustusmudeli poolt ennustatud lühiajalist prognoosivälja. Praegusel ajal kasutavad kõik operatiivkeskused uue ennustuse algtingimuste määratlemisel taustväljana reeglina mudeli lühiajalist 6-tunnist ennustust.

Kus iganes vaatlus ka tehtud pole, võib ta endas sisaldada vigu. Ka NWP-mudelid ei ole täiuslikud, kuna paratamatult tekivad vead piiratud ruumilise lahutusvõime tõttu ja füüsikalise parametrizeerimise käigus. Kuna analüüsi tegemiseks kasutatakse nii vaatlusi kui ka varasemat mudelprognoosi, siis võivad nad mõlemad põhjustada analüüsis vigu. Sellepärast on vajalik, et andmete assimilatsiooni algoritm suudaks hinnata analüüsi täpsust ja annaks vigade kohta informatsiooni. Informatsioon

vaatlusandmete ja mudeli vigade kohta saadakse eelnevast vigade statistilisest analüüsist. Põhiliselt kasutatakse vaatlusandmete- ja mudelivigade statistilist informatsiooni selleks, et määrata kui lähedane peaks analüüs olema vaatlustele või mudelprognoosile. (Browning et al, 1999).

1.8.2 Andmete assimilatsiooni meetodid

Hea andmete assimilatsiooni meetod peab tähelepanu pöörama kogu kättesaadavale informatsioonile, mis käsitleb antud hetke atmosfääri seisundit. Iga vaatlus läheb sisse teatava kaaluga, mis arvestab vaatlusvigu ja taustvälja vigu antud punktis (neid annab statistika) ning ka vaatluste tihedusega.

Kuigi ajalooliselt on probleemile lähenetud erinevatest vaatepunktidest, on tänapäeval kasutatavad andmete assimilatsioonimeetodid üksteisega sarnased. Nende omavahelised erinevused tulenevad kasutatud lähendustest.

Suurem osa operatiivsetest andmete assimilatsioonisüsteemidest põhineb optimaalsel ehk statistilisel interpoleerimise (OI) meetodil, mis eeldab, et analüüsi juurdekasvu määramisel on iga mudeli muutuja jaoks olulised vaid mõned vaatlused. Mõned NWP-keskused kasutavad ka uuemat kolmemõõtmelist variatsioonanalüüsil (3DVAR) põhinevat assimilatsiooni süsteemi. Mõlema meetodi puhul saadakse analüüs minimeerides funktsiooni, mis on defineeritud mõõtma erinevust ühelt poolt analüüsitulemuse ja taustvälja, teiselt poolt aga analüüsitulemuse ja vaatlusandmete vahel. (Bouttier, 1999).

Tuleviku andmete assimilatsiooni meetodeid võib vaadelda kui olemasolevate operatiivsete meetodite edasiarendusi. Kahtlemata toob üldistamine endaga kaasa suureneva arvutuskulu. Tulevikus hakkavad ilmselt domineerima kaks praegu väljatöötamisel olevat andmete assimilatsiooni meetodit: Karman-Bucy filter ja neljamõõtmeline variatsioonanalüüs (4DVAR).

1.8.3 Andmehõive ja selle tähtsus

Traditsiooniline assimilatsioonitsükkel kasutatav andmebaas saadakse põhiliselt järgmistest vaatlustest:

- a) Aeroloogiline sondeerimine, kust saadakse temperatuuri, niiskuse ja tuule vertikaalsed profiilid;
- b) lennukitelt tehtavad vaatlused, kust saadakse lennukõrgusel temperatuur ja tuul;
- c) vaatlusjaamadest, laevadelt ning liikuvatelt ja liikumatutelt boidelt, kust saadakse atmosfääri seisundit kirjeldavad parameetrid: õhurõhk, temperatuur ja niiskuse andmed aluspinnal;

Alates 1979 aastal toimunud Globaalsest Ilmaeksperimentist (*Global Weather Experiment*), on hakatud kasutama satelliidiandmeid. Satelliidi andmed sisaldavad (Browning et al, 1999):

- a) TOVS (*TIROS Operational Vertical Sounders* – TIROS Operatiivne vertikaalsondeerija) vertikaalseid pilte NOAA polaarorbitaalsetelt satelliitidelt, milledest tuletatakse operatiivselt temperatuuri- ja niiskuseväljad;

- b) pilvede liikumiskõrgusel saadakse tuuled geostatsionaarsetelt ilmasatelliitidelt (GOES, METEOSAT, GMS);
- c) aluspinnatuuled, mis saadakse skatteromeetriliste vahenditega mitmetelt polaarorbiitidelt nagu ERS (Euroopa), ADEOS (Jaapan) ja SSM/I (Defense Meteorological Satellite Program, DMSP);

Saadava andmebaasi tähtsus ja kasulikkus sõltub mitmetest teguritest, sh kas andmed on esitatud vertikaalses profiilis või mingil horisontaalsel tasapinnal ning muidugi andmete täpsusest. Üldjoones arvestatakse vaatlustulemuste kasutamisel järgmisi asjaolusid (Browning et al, 1999):

1. atmosfääriparameetrite vertikaalprofiilid on oluliselt informatiivsemad kui üksiku horisontaaltasapinna andmed. Sellepärast on aeroloogia jaamade võrgustik praeguse vaatlussüsteemi alustalaks;
2. tuuleandmed hinnatakse mõnevõrra rohkem kui temperatuuri- ja õhurõhuandmed, eriti troopikaaladel;
3. niiskusandmed on kõige kasulikumad väga lühiajaliste prognooside (kuni 12-tunniste prognooside jaoks) puhul. Pikemate prognooside puhul kui üks päev, kalduvad prognoosimudelid jõudma hüdroloogilisse tasakaalu, mille tõttu vanemaid niiskusvaatlusi eiratakse. Mullaniiskuse initsialiseerimiseks on kasutatud aluspinna temperatuuri- ja niiskusevaatlusi;
4. Lõunapoolkeral on suurte veealade tõttu olulise tähtsusega satelliidivaatlused, kuna neil aladel on aluspinnalt ja lennukitelt tehtud vaatlusi väga vähe. Põhjapoolkeral on satelliidiandmete tähtsus väiksem;
5. tulevikus, kui peamisteks arendustöö teemadeks saavad mesomastaapne modelleerimine ja andmeassimilatsioon, omandavad olulise rolli Doppler'i radarite poolt saadud kõrge lahutusvõimega sademete- ja tuuleandmed.

2. HIRLAM

HIRLAM (*High Resolution Limited Area Model*) on kõrglahutuslik regionaalmodel. Nimega HIRLAM tähistatakse nii rahvusvahelist ühisprojekti kui ka numbrilist ilmaennustamismudelit. Projekti HIRLAM eesmärk on numbrilise ilmaennustussüsteemi edasi arendamine ja parandamine projektis osalevate rahvuslike ilmaennustuskeskuste operatiivkasutuseks. Projekt sai alguse 1985. aastal. Operatiivses kasutuses on momendil HIRLAM-6, mis põhineb vastavalt projekti kuuenda etapi HIRLAM-6 tulemustele. (Unden et al, 2000).

Rahvusvahelises projektis HIRLAM osalevad järgmised rahvuslikud keskused:

- Hispaania Meteoroloogiainstituut (*INM*);
- Hollandi Kuninglik Meteoroloogiainstituut (*KNMI*);
- Iirimaa Meteoroloogiateenistus (*IMS*);
- Islandi Meteoroloogiaamet (*VI*);
- Norra Meteoroloogiainstituut (*DNMI*);
- Rootsi Meteoroloogia ja Hüdroloogia Instituut (*SMHI*);
- Soome Meteoroloogiainstituut (*FMI*);
- Taani Meteoroloogiainstituut (*DMI*);

Samuti osaleb ühisuuringutes Prantsusmaa Ilmateenistus (*Meteo-France*).

HIRLAM projekti kontrollitakse HIRLAM nõukogu poolt, milles osalevad koostööd tegevate instituutide direktorid. Projekti juhitakse juhtimisgrupi poolt, kus on olemas projekti üldine juht, andmete assimilatsiooni projektijuht, prognoosimudeli projektijuht ja süsteemihaldur. Juhtimisgrupp pannakse paika Teadusliku ja Tehnilise Nõuandva Komitee poolt. (Unden et al, 2000).

HIRLAM põhisisüsteemi ehk referentssüsteemi, kuhu viiakse sisse kõik HIRLAM-is tehtavad muudatused, hoiti varem ECMWF (*European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*) juures, kuid praeguseks on referentssüsteemi haldajaks FMI. Põhisüsteemi uuendatakse pidevalt ja momendil (alates 2003) on kasutusel HIRLAM 6.2.1.

Kuigi enamik operatiivsetes prognoosisüsteemides kasutatavad komponendid võetakse HIRLAM referentssüsteemist, erinevad HIRLAM-mudeli operatiivsed versioonid koostööd tegevate riikide vahel olenevalt sellest, milliseid arvutisüsteeme kasutatakse ja kuidas on valitud tehniline strateegia. Iga projektis osalev riik on operatiivse mudeli kohandanud vastavalt oma suurusele ja vajadustele.

2.1. Mudeli dünaamika

Mudel on hüdrostaatiline võrgupunkti mudel, mille horisontaalne lahutusvõime võib varieeruda 55 kilomeetrist kuni 1 kilomeetrini ning vertikaalselt saab kasutada kuni 40 taset (Unden et al, 2002). Koordinaatsüsteemina kasutatakse horisontaalselt sfäärilist koordinaadistikku ja vertikaalselt sigma-rõhu hübriidkoordinaate. Vertikaalsed tasemed jaotatakse nii, et kõige tihedamalt paiknevad nad maapinna lähedal, kus tasemed järgivad topograafiat. Ülemised mudeltasemed (alates tropopausist ülespoole) on aga konstantse rõhu tasemed.

Nagu kõik piiratud ala modelid põhineb ka HIRLAM primitiivvõrranditel, mida on lähemalt kirjeldatud eespool (Peatükk 1.3.). Horisontaalselt kasutatakse Arakawa C võrgustikku (Sass et al, 1999).

Ajaline integreerimine toimub kas pool-ilmutamata Euleri skeemi järgi, või pool-ilmutamata Langrange'i skeemi abil.

Numbrilise müra silumiseks kasutatakse IV järku horisontaalset difusioonifiltrit. Silumine on vajalik selleks, et vältida energia akumulierimist kõige lühematel lainepikkustel. (Sass et al, 1999).

2.2. Mudeli füüsika ja järeltöötlus

HIRLAM poolt operatiivses kasutuses olevate mudelite võrgu suurus varieerub 55 kuni 1 km-ni, mistõttu on siin erineva lahutuse puhul parametrizeerimise jaoks olulised teatud kohandused. Võimalikud on kaks lahendust:

- 1) teatud häälestamise tegemine, näiteks lahutuse uuendamise näol. Seda kasutatakse laialdaselt atmosfääri modelleerimise juures, kus puudub täpne arusaam õige lahutuse ja füüsika sõltuvusest.
- 2) arusaamine füüsika sõltumisest teatud mastaabist ning vastavate sõltumiste jaoks matemaatiliste avaldiste loomine, mis põhinevad piisavalt headel kõrge ja madala lahutuse hinnangutel. Seda lahendust kasutatakse ka HIRLAM mudeli puhul. HIRLAM püüab lihtsaid mooduseid kasutades arvestada mõningate mastaabist sõltuvate vertikaalse ülekande iseärasustega. Nähtused, mis omavad teatud tähtsust vähem kui 10 km lahutuse juures, pole siiani veel HIRLAM füüsikablokki kaasatud.

Projekti HIRLAM raames on välja arendatud kiirgusskeem, mille eesmärk on kirjeldada kiirgusvoogusid atmosfääri läbiva lühi- kui pikalainelise kiirguse korral. Kasutatav kiirgusskeem käsitleb kiirgust lihtsustatud moel. (Sass et al, 1999).

Praegune operatiivne konvektsiooni skeem põhineb niiskuse konvergensil ja teda võib vaadelda Kuo skeemi edasiarendusena. Skeemi nimetatakse STRACO (*Soft TRansition COndensation* - pehme üleminek kondenseerumisele), mis tegeleb astmeliste üleminekutega konvektiivsete ja kihtpilvi käsitlevate skeemide vahel. (Sass et al, 1999).

Turbulentsuse parametrizeerimise juures kasutatakse turbulentset kineetilist energiat prognostilise parameetrina (Cuxart-Bougeault-Redelsperger (CBR) skeem) (Cuxart et al, 2000). CBR-skeemiga õnnestub tsükloneid täita varajases elutsükli faasis paremini, mistõttu ta parandab õhurõhu prognoosi teatud piirkondades nagu Skandinaavia, kus varem oli probleeme tsüklonite täitumisega (Eerola, 1999).

Turbulentsed aluspinna vood arvutatakse numbrilistes prognoosimudelites takistusvõrranditest, ühendades aluspinna vood keskmise aluspinna ja atmosfääri mudeli alumise kihi parameetritega (Sass et al, 1999).

HIRLAM-i aluspinna parametrizeerimisskeem kirjeldab aluspinna temperatuuri-käiku, veesisaldust ja lumepaksust maismaal või jääga kaetud alal lihtsate prognostiliste võrranditega. Maapinda kirjeldatakse kolmekihilise mudeliga.

Mudelite piirikihi parametrizeerimine põhineb Monin-Obukhov sarnasusteorial, mis eeldab, et liikumishulga- ja soojusvood on aluspinnakihi kõrgusega peaaegu konstantsed (Tisler, 1999).

Avatud mere kohal sõltub aluspinnakaredus tuulekiirusest. Maapinna ja jää kohal on aluspinnakaredus aja jooksul konstantne. Tuulekiiruse nagu ka temperatuuri ja niiskuse profiilid arvutatakse diagnostiliselt, kasutades kõige madalama mudeli taseme ja aluspinna piirikihi parameetreid, mille hulka arvatakse ka aluspinna karakteristikud. Võrguruutudes, kus esineb nii merd kui maad, kasutatakse domineerivamat aluspinna tüüpi. (Tisler, 1999).

Väga tähtis on alumise piiriala tingimuste täpne määrang. Tähtis on see sellepärast, et ilmaprognoosi parameetreid vajatakse maapinna lähedalt. Erinevaid aluspinnaväljasid (nt. aluspinna geopotsiaal, albeedo, karedus, mullatemperatuur ja -niiskus ning aluspinnatüübid) on vaja adekvaatseks aluspinna ja atmosfääri piirikihi parametrizeerimiseks. Kvaliteetseid suure lahutusega füsiograafilisi andmeid vajatakse väljade täpseks arvutamiseks. Tarkvara võimaldab kasutada Hierarhilist Andmeformaati (HAF, inglise keeles *HDF - Hierarchical Data Format*), mis ühtlustab sisendfailide struktuuri. (Sass et al, 1999).

Järeltöötamiseks on olemas vastav tarkvarapakett, mis võimaldab teisendada väljundtulemusi Rahvusvahelise Meteoroloogia Organisatsiooni (RMO, inglise keeles *WMO - World Meteorological Organisation*) standartsesse GRIB-formaati.

Mudeli diagnostika ja kontrollimise jaoks on eraldi olemas diagnostiliste arvutuste standardpakett. (Unden et al, 2000).

2.3. Analüüs ja initsialiseerimine

Aluspinna õhurõhu (p_0), temperatuuri (T), tuule komponentide (u , v), õhuniiskuse (q), pilvevee sisalduse (m) ning turbulentse kineetilise energia algväljade määramine põhineb optimaalse interpoleerimise (OI) skeemil, mis on tuletatud ECMWF varasemast skeemist. Skeem on kohandatud kasutuseks piiratud alaga mudelis, kuid põhilised süsteemikarakteristikud on samad, mis ECMWF globaalmudelis. Enamik projektis osalevaid institute kasutavad algtingimuste määramiseks kuuetunnist, osa ka kolmetunnist andmete assimilatsiooni tsükli. Vaatlusandmed saadakse raadiosondidelt, satelliitidelt, lennukitelt, vaatlusjaamadest, laevadelt jne.

Initsialiseerimisel kasutatakse digitaalset filtreerimist (*DFI – Digital Filter Initialization*), mis põhineb digitaalsignaalide töötlemisel. Võrreldes teiste analoogiliste skeemidega, võib DFI puhul välja tuua järgmised eelised, teda on lihtne kasutada ja modifitseerida, ta on kohaldatav kõikidele prognostilistele muutujatele, on kohaldatav mittehüdrostaatilistele mudelitele jne. (Lynch, 1999). Võrreldes normaalmoodi initsialiseerimisskeemiga (*NMI – Normal Mode Initialization*) nõuab DFI aga suuremat arvutimälu.

Kuna HIRLAM-mudel ei hõlma tervet maakera, siis on vaja arvestada ka ääretitingimusi. Külgmised piirväärtused saadakse ECMWF globaalmudelist. Piiriväljad kohandatakse HIRLAM võrku horisontaalse ja vertikaalse interpoleerimise teel. Merepinna temperatuuri ning jää- ja lumikatet analüüsitakse SMHI poolt järk-järgulise lähendamise meetodiga. (Unden et al, 2000).

2.4. HIRLAM tehniline pool

HIRLAM-süsteem on kujundatud porditavaks, mis tähendab seda, et ta on võimeline töötama erinevatel arvutitel erinevate operatsioonisüsteemidega. Programmeerimiskeelena kasutatakse enamasti Fortran-77. Mõningad osad on kirjutatud Fortran-90-s ja osa on C-keelsed programmid. Süsteemi haldavad käsufailid on kirjutatud Unix Bourne Shell süntaksis. Süsteemi sisendi puhul kasutatakse WMO standartset BUFR-koodi (*Binary Universal Form for the Representation of meteorological data*) vaatlusandmete jaoks ja GRIB-koodi (*GRIdded Binary*) väljade esitamiseks. Väljastatavad tulemused antakse GRIB-formaadis. Süsteemi saab käima panna Cray (C90, T3E), SGI (f77 ja f90), Fujitsu ja Dec Alpha ning teistel GNU-Fortranit kasutatavatel arvutitel, näiteks Linux operatsioonisüsteemil baseeruvatel PC-del. (Unden et al, 2000).

Alates 2002 aasta lõpust pandi Eesti Meteoroloogia ja Hüdroloogia Instituudis (EMHI) tööle klaster (joonis 2). Klaster koosneb 12 omavahel gigabitise ethernet-kaardiga ühendatud protsessorist, switch'ist ja UPS'ist, mis on Linux operatsioonikeskkonnas ühendatud terviksüsteemiks. Terviksüsteemi peale on installeeritud numbrilise ilmaennustusmudeli HIRLAM tarkvara. Klaster võimaldab läbi viia ilmaennustamiseks hädavajalikke suuremahulisi arvutusi reaalajas.



Joonis 1. Klaster EMHI-s

3. Töös kasutatavad andmed ja metoodika

3.1. Vaatlused

Antud töö jaoks valiti välja peamiselt rannikul, saartel ja avameres paiknevad vaatluskohad, mida võrreldi hüdrostaatilise ja mittehüdrostaatilise mudeli andmetega. Vaatluspaikade kirjeldamisel vaadeldi igat kohta eraldi, kuna vaatlusandmed sõltuvad tugevasti jaama paiknemisest, lokaalsetest iseärasustest ja jaama kõrgusest aluspinna suhtes. Tuulevaatluste puhul arvestati järgmiste tingimustega (Heiskanen et al, 1998):

- 1) Erinevate vaatlusjaamade mõõteriistade kõrgus varieerub võrreldes merepinna tasemega, samas kui vastavalt WMO standardi järgi mõõdetakse vaatlusjaamades tuulekiirust ja –suunda 10 m kõrgusel aluspinnast;
- 2) Tuul võib olla häiritud teatud tuulesuundades. Saar(-ed), puu(-d), ehitis(-ed) jne. avaldavad mõju mõõdetavale tuulekiirusele ja -suunale;
- 3) Erinevates vaatlusjaamades tehakse vaatlusi erinevatel aegadel;
- 4) Vaatlustulemused esitatakse piiratud täpsusega. Piiratud täpsuse all mõeldakse seda, et vaatlusjaamade poolt antakse parameetrid teatud kindlate vahemike kaupa nagu näiteks tuulekiirust antakse täpsusega 1 m/s ja tuulesuunda 10°-ise täpsusega.;

Eesti vaatlusjaamade puhul mõõdetakse tuuleparameetreid piiratud täpsusega, tuulekiirus antakse vastavalt 1 m/s ja tuulesuund 10°-ise täpsusega.

Vaatluskohtade iseloomustamisel esineb kaks erinevat mõistet: vaatlusjaam ja vaatlustorn. Vaatlusjaama all mõistame käesolevas töös vaatluste tegemiskohta, mis paikneb kas rannikualal või saarel. Tema puhul on selgemini tuntav maismaa mõju vaatlusandmetele. Vaatlustorni all mõeldakse vaatluste tegemiskohta, mis paikneb avameres ning tema puhul maismaa märgatavat mõju ei avalda (v.a., jäätingimuste korral ja juhul, kui ta paikneb ranniku lähedal).

Kui tuul puhub maalt merele, läheb enne aega kui moodustub merelise tuule profiil. Seetõttu peaksid mudeli prognooside paremad tulemused esinema kohtades, kus maa, saar(t)e või jää mõju on väiksem. See oli üheks põhjuseks, miks antud töö vaatlusjaamadeks valiti Läänemeres või Läänemere rannikualadel paiknevad jaamad. Lisaks osutus määravaks vaatlusandmete olemasolu EMHI andmebaasis ning varasemad andmed Soome vaatlustorni Kålbagrundi kohta, mis jäi vaadeldavasse alasse sisse. Nendest eeldustest ja põhjustest lähtudes valiti välja 1 Soome vaatlustorn - Kålbagrund ning 6 Eesti vaatlusjaama – Kihnu, Kunda, Pärnu, Ristna, Sõrve ja Vilsandi (joonis 2).

Järgnevalt on iga vaatluskoha tuuleanduri asukoha ja teda piiravate takistuste kohta antud detailsem kirjeldus.

Kihnu vaatlusjaam asub Edela-Eestis Liivi lahe kirdeosas paikneval Kihnu saarel. Meteoroloogiaväljak jääb saare lõunatippu, 40 m kaugusele merest ja umbes 100 m kaugusele majakast. Ala on üldiselt tuulele avatud, põhja pool 30-50 m kaugusel väljakust kasvab lepavõsa ja üksikud kased ning idas 30 m kaugusel põõsastik ja üksikud männid. Lähemad ehitused, mis asuvad väljakust 100 m raadiuses: jaama ühekorruseline maja 15 m loodes. Tuuleandur asub 12.8 m kõrgusel aluspinnast.

Kunda vaatlusjaam paikneb Põhja-Eesti rannikul Soome lahe ääres. Meteoväljak asub tasasel niidul, u. 70 m kaugusel veepiirist. 25 - 30 m kaugusele loodesse jäävad ühekordsed puumajad. Väljaku ümber on aiamaad, kuid üldiselt on ümbrus avatud. Tuuleanduri kõrguseks on 10.2 m.

Pärnu vaatlusjaam asub Pärnu lahe kaldal Pärnu ja Sauga jõe suudmealal. Meteoväljakust kirdes asub 1.5 m kõrgune tara, lõuna suunas kasvavad üksikud kõrged pargipuud ja läänes üksikud madalad viljapuud. 25 – 30 m kaugusele jäävad tänavad ühekorruseliste majade ja aedadega. Tuulemõõtur paikneb Pärnu linnas Chaplini keskuse katusel. Tema kõrgus katusest on 4.4 m ja maapinnast 25 m.

Ristna meteoroloogiajaam asub Hiiumaal, Kõpu poolsaare edelatiipus. Meteoväljak asub väikesel lagendikul mere ääres, 200 m kaugusel rannast ning on piiratud loodest lõunani metsaga. Avatuks jääb üksnes merepoolne põhiliselt lääne suund. Põhja poolt algab mets 40 m kauguselt. Lähimad majad jäävad loodesse ja põhja. Tuuleanduri kõrgus on 12.6 m.

Sõrve vaatlusjaam asub Saaremaa edelaosas paikneva Sõrve poolsaare tipus. Väljak jääb vaatlusjaamast 120 m kaugusele põhja suunas ja veepiir jääb nii idas kui läänes 70 m kaugusele. Tuulemõõturi kõrgus on 12.8 m.

Vilsandi vaatlusjaam asub Saaremaa läänerannikul asuval Vilsandi saarel. Meteoväljak paikneb vaatlusjaama lähedal, jäädes viimasest 14 m kaugusele kagus. Teine lähim maja jääb väljakust edelasse. Veepiir jääb 125 m kaugusele. Tuuleanduri kõrgus on 10.2 m.

Kålbadagrund on Soome lahe põhjaservas paiknev Soomele kuuluv vaatlustorn. Kuna ta paikneb avameres, siis tema puhul on avatus erinevatest ilmakaartest puhuvatele tuultele hea. Tuuleanduri kõrgus on 31.8 m.

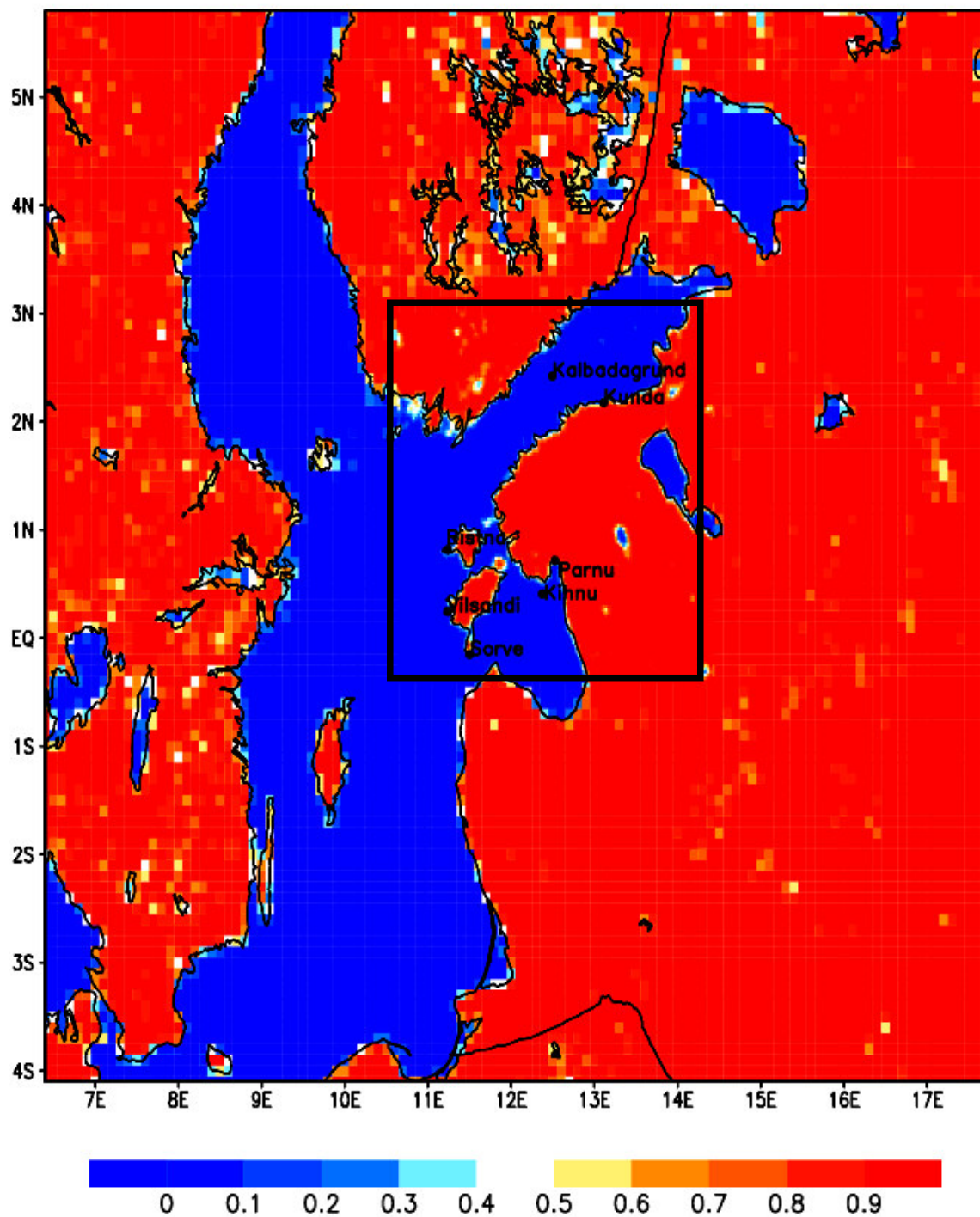
3.2. Rakendatud mudelversioonide H11 ja MH3 kirjeldus

Käesoleva töö ülesandeks on võetud Läänemeresel esinevate keskmiste tuulekiiruste ja tuulesuuna jaotuste võrdlemine vaatlusandmete ja kõrge lahutusega hüdrostaatilise (H11) ning väga kõrge lahutusega mittehüdrostaatilise (MH3) versiooni vahel. H11 puhul kasutati kõrge lahutuse juures HIRLAM versiooni 6.1.0 hüdrostaatilises arvutusrežiimis. MH3 puhul kasutati väga kõrge lahutuse juures sama baasmudelit sisselülitatud mittehüdrostaatilise dünaamika arvutuspaketiga.

Kuna tegemist on piiratud ala mudeliversioonidega, siis analüüsitud algandmed saadi Soome Meteoroloogia Instituudi (FMI) 22 x 22 km lahutusega hüdrostaatilisest mudelist.

Tulemuste analüüsimisel kasutati H11 juures täiendavalt optimaalse interpoleerimise meetodit samas kui MH3 puhul enam täiendavat analüüsi ei tehtud vaid kasutati FMI-st saadud analüüsitud parameetrite välju.

Vaatlustulemusi võrreldi mõlema mudelversiooni poolt tehtud ennustustega, et näha milliseid tulemusi annavad erineva lahutuse ning dünaamikaosaga mudelid. Esimesel juhul ehk hüdrostaatilise versiooni puhul kasutati 114 x 100 võrgupunkti juures horisontaalset lahutusvõimet 0.1 kaarekraadi (11 x 11 km) ja vertikaalselt eristati 31 taset. Teise mittehüdrostaatilise versiooni puhul oli horisontaalne lahutusvõime 126 x 114 võrgupunkti juures 0.03 kaarekraadi (3.3 x 3.3 km) ja vertikaalseid tasemeid oli samuti 31 (joonis 2).



Joonis 2. Töös kasutatavad ennustusalaad ja vaatlusjaamad. Kogu joonis kirjeldab kõrge lahutusega (võrgusamm 11 km) hüdrostaatilise dünaamikaga (H11) mudeli integreerimispiirkonda. Musta ristkülikuga on markeeritud väga kõrge lahutusega (võrgusamm 3.3 km) mittehüdrostaatilise dünaamikaga (MH3) mudeli ala. Joonise all esitatud värviskaala kirjeldab mudeli vee ja maismaa alade jaotust.

3.3. Metoodika

Vaatluse alla võeti periood 27.11.1999 - 06.12.1999. Taoline hilissügiselt eeltalvele üleminekuperiood valiti osalt seetõttu, et käepärast oli algandmed selle perioodi kohta ning teisalt seetõttu, et antud ajaperioodil esines küllaltki vaheldusrikas ja tormine ilm. Eesmärgiks oli vaadata, kuidas erineva lahutuse ning dünaamikaga mudeli versioonid antud ajaperioodi ilma analüüsimise ja ennustamisega toime tulevad.

Vaadeldavate tuuleandmetena kasutati 3-tunni keskmisi tuulekiiruseid ja tuulesuundi. Neid võrreldi H11 puhul analüüsist 24-tunnise prognoosini ning MH3 puhul analüüsist 12-tunnise prognoosini. Mõlema mudelversiooni puhul oli prognooside ajaline intervall 3 tundi. Pikemate prognooside tegemisel muutusid määravaks mitmed MH3 arvutamist kitsendavad tegurid. Peamisteks arvutust kitsendavateks teguriteks MH3 juures olid:

- 1) Liiga väikese ala kasutamine, mis jäi kohati ilmasituatsiooni kiirele arengule väikseks. Suurema ala kasutamine oleks olnud suure arvutusmahukuse tõttu väga aeganõudev ja vaevaline;
- 2) Euler ilmutatud ajaline integreerimisskeem, mis tegi CFL stabiilsustingimuse (vt. peatükk 1.5.1) tõttu ennustuse arvutamise aeganõudvaks;
- 3) MH3 vajadustele ehk väga kõrge lahutuse tingimustele sobiva kliimaandmebaasi puudumine. H11 juures kasutatav kliimaandmebaas oli MH3 jaoks liiga madala lahutusega;
- 4) Skaleerimisest tulenevad piirangud. Kuna MH3 ääretingimused saadi 22 km lahutusega mudelist, siis osutus nende üleviimine väga kõrge lahutusega mudelile problemaatiliseks. Põhjustas MH3 jaoks olulist täpsusekadu.

H11 puhul kasutati väiksema lahutuse juures suuremat ala ja prognoosi arvutamisel Pool-Langrange ajalist integreerimisskeemi, mistõttu siin probleeme ei esinenud.

Mudeli- ja vaatlusandmeid võrreldi olenevalt vaatlusjaama kõrgusest kas mudeli alumisel tasemel (umbes 30 m kõrgusel aluspinnast) või ekstrapoleeriti mudeli alumise taseme tulemused aluspinnast u 10 m kõrgusele. Kuna käesolevas töös kasutatud Soome vaatlustorni tuuleandur asub kõrgemal kui 30 m, võrreldi Kålbagrundi tuuleparameetrid mudeli alumise taseme tuuleparameetritega. Eesti vaatlusjaamade tuuleandurite puhul kasutati võrdluskõrgusena 10 m taset, kuhu tuuleparameetrid ekstrapoleeriti kõige alumisest mudeli tasemest.

Käesolevas töös vaadeldi HIRLAM mudeli versioonide poolt prognoositud tuulekiiruse ja -suuna keskmist ning ruutkeskmist viga vaatlusandmetega võrreldes. Prognoosi keskmise vea all mõeldakse tema keskmist kõrvalekallet mõõdetud suurusest ehk süstemaatilist viga. Keskmise vea (ME – *Mean Error*) puhul kasutatakse valemit (Course EuroMET, 1997):

$$ME = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (F_i - O_i), \quad (20)$$

kus

N – prognooside arv; $i = 1, \dots, N$;
 F_i – prognoositud väärtus;
 O_i – vaadeldud väärtus.

ME näitab keskmist kõrvalekallet prognooside ja mõõdetud väärtuste vahel. Kui ME on positiivne ($ME > 0$), siis prognoositud väärtused ületavad tegeliku keskmise ehk tegemist on üleennustamisega. Kui esineb vastupidine olukord ($ME < 0$), esineb allaennustamine. Tuule suuna puhul mõeldakse allahindamise all seda, et ennustatud tuulesuund on võrreldes vaatlustel saadud tulemusega pööratud vastupäeva.

Prognoosi ruutkeskmise viga näitab üksikute prognooside ja vastavate mõõtmistulemuste keskmist kokkulangevust e hajuvust. Ruutkeskmise vea ($RMSE$ – *Root Mean Square Error*) puhul kasutatakse valemit (Course EuroMET, 1997):

$$RMSE = \sqrt{\left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (F_i - O_i)^2 \right)}. \quad (21)$$

Prognoos on täpne, kui RMSE on võrdne nulliga.

Lisaks keskmisele ja ruutkeskmisele veale hinnati veel mudeli ja erinevate jaamade vaatlustulemuste sõltuvust üksteisest ning regressiooniparameetreid. Sõltuvuse hindamiseks kasutati korrelatsioonikordajat (R), mis näitab kuidas kaks muutujat on omavahel lineaarselt seotud. Korrelatsioonikordaja väärtus jääb -1 ja +1 vahele. Juhul kui tegemist on tugeva seosega, on tulemus -1 või +1 lähedal. Kui korrelatsioonikordaja väärtus on 0 lähedal, siis on kahe muutuja vaheline seos nõrk. Positiivse väärtuse puhul on regressioonisirge tõusev, negatiivne väärtuse korral on regressioonisirge langev. Korrelatsioonikordaja arvutatakse järgmiselt (Roomets, 2003):

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (F_i - \bar{F})(O_i - \bar{O})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (F_i - \bar{F})^2 \sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}} = \frac{Cov(F, O)}{S_F S_O}, \quad (22)$$

kus

$\bar{F}$ on prognoositud väärtuste aritmeetiline keskmine;

$\bar{O}$ on vaadeldud väärtuste aritmeetiline keskmine;

S_O on vaatluste standardhälbe;

S_F on mudeli prognooside standardhälbe.

Regressioonianalüüsi kasutatakse pidevate tunnuste vahelise sõltuvuse leidmiseks. Lihtsamal juhul võetakse tunnuste vaheliseks seoseks sirge, mille võrrand on:

$$y = a + bx, \quad (23)$$

kus

y ehk O on vaadeldud väärtuse ennustatav väärtus;

x ehk F on prognoositud väärtus;

a on regressioonisirge vabaliige:

b on regressioonisirge tõus ehk regressiooni joone kalle, mis joonistub välja vaatlusandmete esinemise järgi ning näitab üldist tulemuste sõltuvuse joont:

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n (F_i - \bar{F})(O_i - \bar{O})}{\sum_{i=1}^n (F_i - \bar{F})^2} = R \cdot \frac{S_O}{S_F}, \quad (24)$$

Ka vaadati vaadeldud ja prognoositud tuulekiirust eraldi erinevate tuule suundade kaupa. Välja valiti klassikalised tuulesuunad - põhja (N), loode (NW), lääne (W), edela (SW), lõuna (S), kagu (SE), ida (E) ja kirde (NE) suund. Valitud ennustusperioodi lühiduse tõttu ei saadud korralikku statistikat teha, kuna kõigi vaatlusjaamade puhul oli osade tuulesuundade esinemine kas puudulik või esinesid üksikud juhtumid. Samas esitati iga vaatlusjaama kohta joonis, kus erinevate värvitoonide ja sümbolitega eristati erinevad tuulesuunad. See võimaldas hinnata, kuidas vaatlusjaamade puhul ära märgitud takistused avaldasid mõju mõõdetud väärtustele. Veel hinnati siin mudelite ja vaatlusjaama andmete korrelatsioonikordajaid ja regressiooniparameetreid.

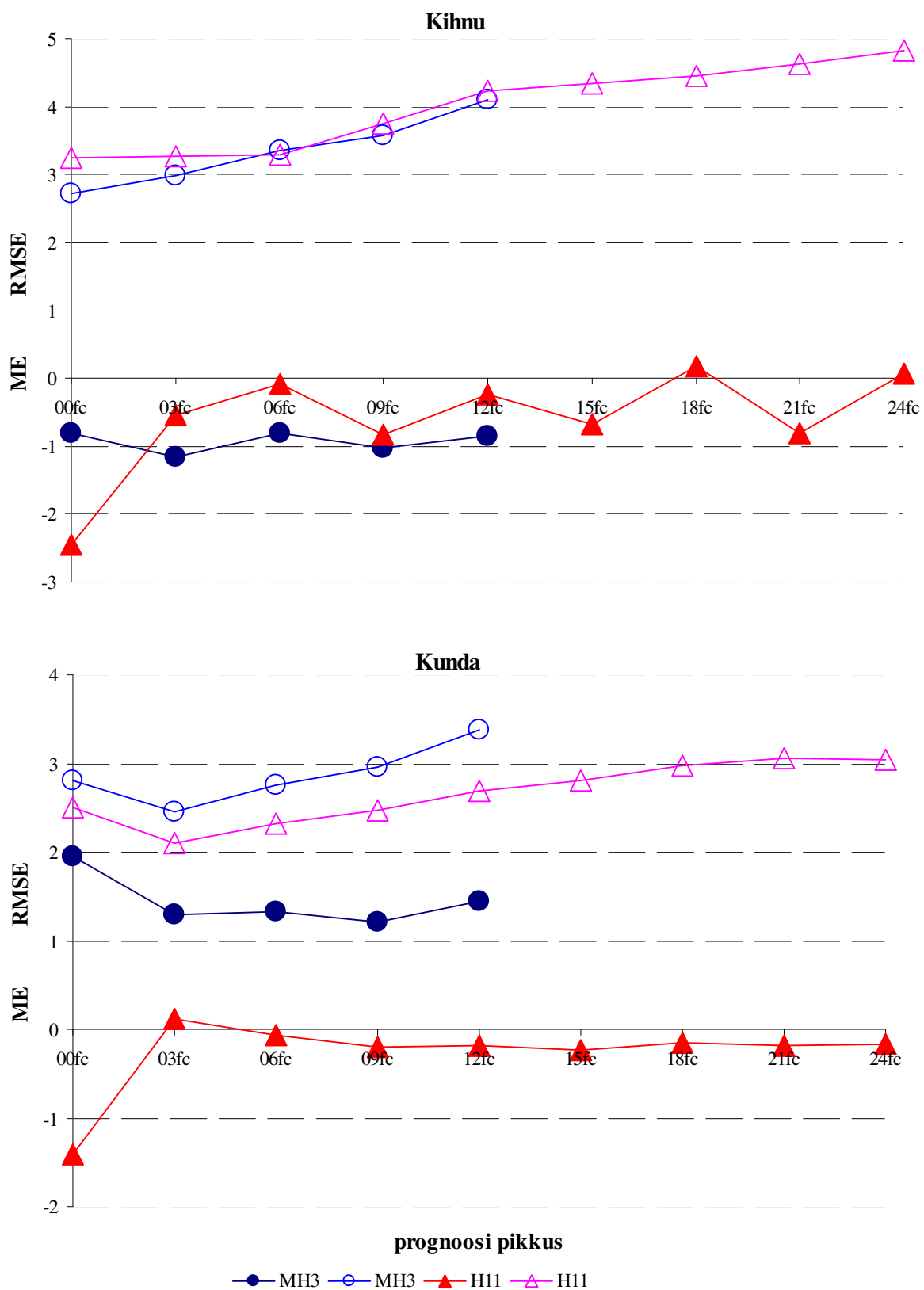
Lõpuks võrreldi mõlema mudelversiooni alumisest tasemest ekstrapoleeritud horisontaalseid tuulevälju 10 m kõrgusel aluspinnast.

4. Tulemuste analüüs

4.1. Mudelite tuulekiiruse prognooside hindamine

Antud juhul võrreldi mudelversioonide erineva pikkusega prognooside tuulekiirusi erinevate vaatlusjaamade tuulekiiruse andmetega (joonised 3 - 6). MH3 puhul kasutati vaatlusandmetega võrdlemiseks analüüsi (00fc), 3-, 6-, 9- ja 12-tunnise prognoosi (12fc). Põhjused miks MH3 puhul ei kasutatud pikemaid prognoose on antud peatükis 3.3. H11 puhul kasutati sarnaselt MH3 prognoosipikkustele lisaks 15-, 18-, 21- ja 24-tunnist prognoosi (24fc). Seega oli H11 ennustusperiood MH3-st poole võrra pikem. Võrdluse tulemusena leiti kui suur oli mudelite prognooside keskmine ja ruutkeskmine viga. Iga jaama kohta toodi eraldi välja joonis, kus esitati kahe erineva lahutuse ja dünaamikaga mudeli ruutkeskmine viga (RMSE) ning süstemaatiline viga (ME). Tulemuste tabelid on antud lisas 1.

Kui võrrelda prognoositulemusi vaatlusandmetega, ilmneb et sõltuvalt jaamast olid tulemused küllaltki erinevad. Kindlat tendentsi siin nii mudelversioonide prognooside endi, kui prognoositud ja mõõdetud tuulekiiruste väärtuste vahel ei esinenud. Siiski üheks seaduspärasuseks, mis joonistelt ilmnes, oli H11 analüüsi pidev allahindamine võrreldes H11 prognoosidega, MH3 analüüsi ja prognoosidega ning vaatlusandmetega va Ristna, kus H11 analüüs oli nullilähedane. Selle põhjuseks on hüdrostaatilis versioonis täiendavalt analüüsi arvutamiseks kasutatav optimaalne interpoleerimismeetod (OI), mis võrreldes prognoosidega alahindas tegelikku tuulekiirust. MH3 puhul antud assimilatsioonimeetodit ei kasutatud, seega võib öelda, et MH3 puhul esitatud analüüs ei erinenud palju FMI suurema mudeli poolt tehtud analüüsist. Prognooside puhul jääb süstemaatiline viga enam-vähem samale tasemele. Seetõttu hinnati mudelversioonide süstemaatilist ja ruutkeskmist viga alates 3-tunnisest prognoosist. Väikseim ruutkeskmine viga oli 3-tunnises prognoosis, mis hilisemate prognooside korral kasvas võrdeliselt prognoosiajaga.



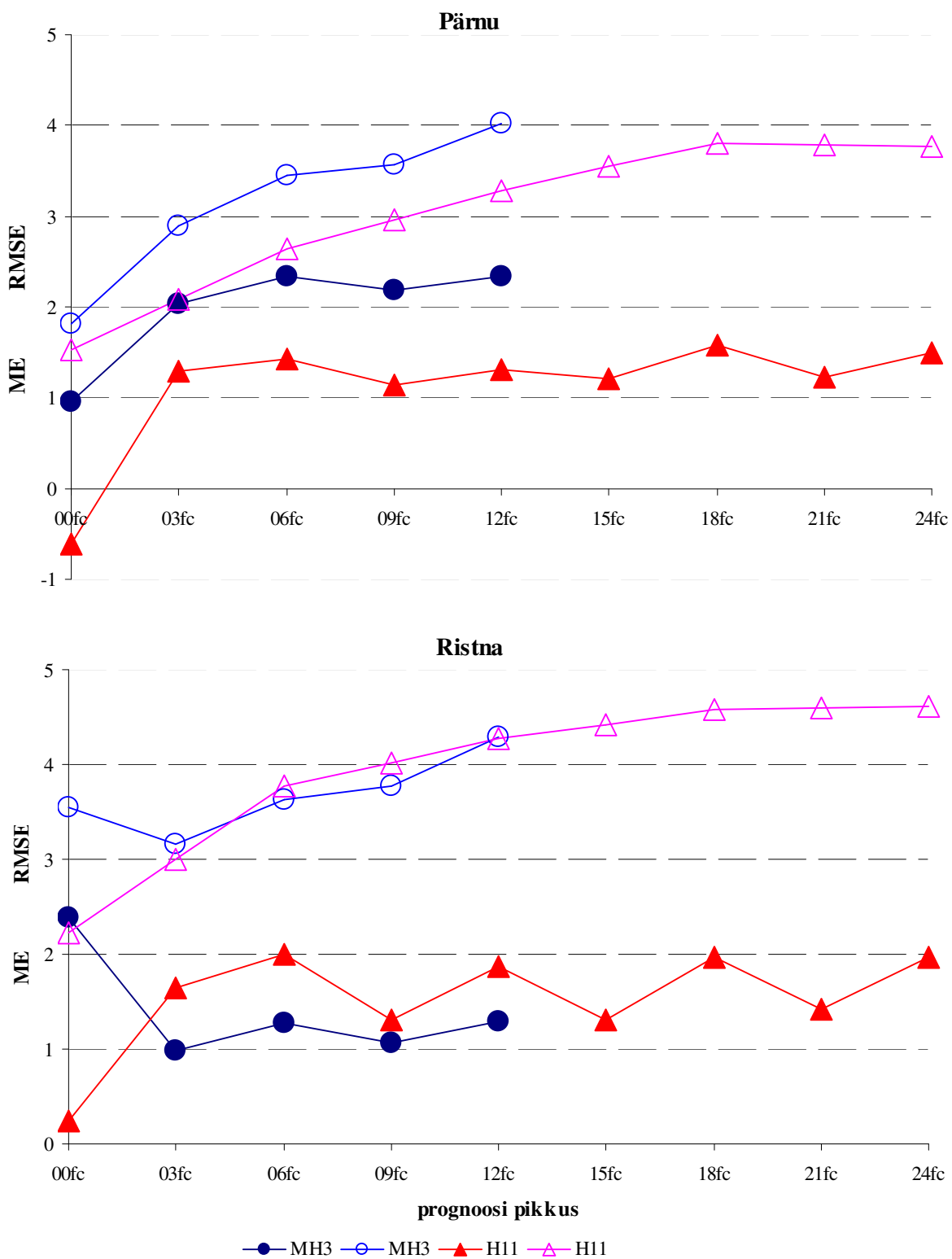
Joonis 3. H11 ja MH3 tuulekiiruse ruutkeskmine (RMSE) ja süstemaatiline (ME) viga Kihnu ja Kunda korral.

Võrreldes mudelite tulemusi iga jaama korral eraldi, oli Kihnu puhul H11 erineva pikkusega prognooside süstemaatiline viga väike, samas kui MH3 prognoosid alahindasid tegelikku olukorda -0.8 - -1.2 m/s (joonis 3). Ruutkeskmise vea puhul andis pisut paremaid tulemusi MH3, kuigi erinevus ei olnud suur. 3-tunnise prognoosi puhul oli MH3 ruutkeskmise viga 3 m/s ja H11 puhul 3.2 m/s, mis vastavalt prognoosi piknemisele jätkas kasvamist. 12-tunnise prognoosi puhul oli MH3 ruutkeskmise viga 4.1 m/s ja H11 puhul vastavalt 4.2 m/s. H11 pikima 24-tunnise prognoosi juures jõudis ruutkeskmise viga väärtuseni 4.8 m/s.

Ka Kunda puhul jäi H11 süstemaatiline viga nulli lähedale (joonis 3). Seevastu MH3 prognoosid ülehindasid vaatlustulemusi keskmiselt 1.2 - 1.4 m/s. Ka oli H11 prognooside kokkulangevus mõõtmistulemustega parem kui MH3-l. Kui 3-tunnise prognoosi puhul oli H11 ruutkeskmise viga 2.1 m/s (MH3 vastavalt 2.4 m/s), siis 24-tunnise prognoosi puhul oli RMSE 3 m/s. MH3 puhul oli 12-tunnise prognoosi RMSE väärtus 3.4 m/s.

Pärnu puhul ülehindasid mõlema mudeli poolt antud erineva pikkusega prognoosid tegelikke vaatlusandmeid (joonis 4). Paremaid tulemusi andis H11, mille erinevad prognoosid ülehindasid vaatlustulemusi keskmiselt 1.3 - 1.6 m/s. MH3 mudeli prognoosid ülehindasid vaatlustulemusi rohkem, süstemaatiline viga jäi siin vahemikku 2 - 2.3 m/s. H11 3-tunnise prognoosi ruutkeskmise viga oli 2.1 m/s ja mis kerkis 24-tunnise prognoosi puhul 3.8 m/s tasemele. MH3 puhul oli 3-tunnise prognoosi ruutkeskmise viga 2.9 m/s ja 12-tunnise prognoosi puhul 4 m/s.

Ristna puhul ülehindasid mudelid vaatlusandmeid sarnaselt Pärnule (joonis 4). Paremaid tulemusi andis siin MH3, mis erinevate prognoosipikkuste juures ülehindas vaadeldud väärtusi keskmiselt 1 - 1.3 m/s. H11 ülehindas vaatlusandmeid keskmiselt 1.3 - 2 m/s. Ruutkeskmise vea väärtused olid mõlemal mudelil sarnased, MH3 3-tunnise prognoosi RMSE oli 3.1 m/s ja H11 puhul vastavalt 3 m/s. 12-tunnise prognoosi puhul oli mõlema mudeli ruutkeskmise viga 4.3 m/s. H11 24-tunnise prognoosi juures kasvas RMSE 4.6 m/s tasemele.

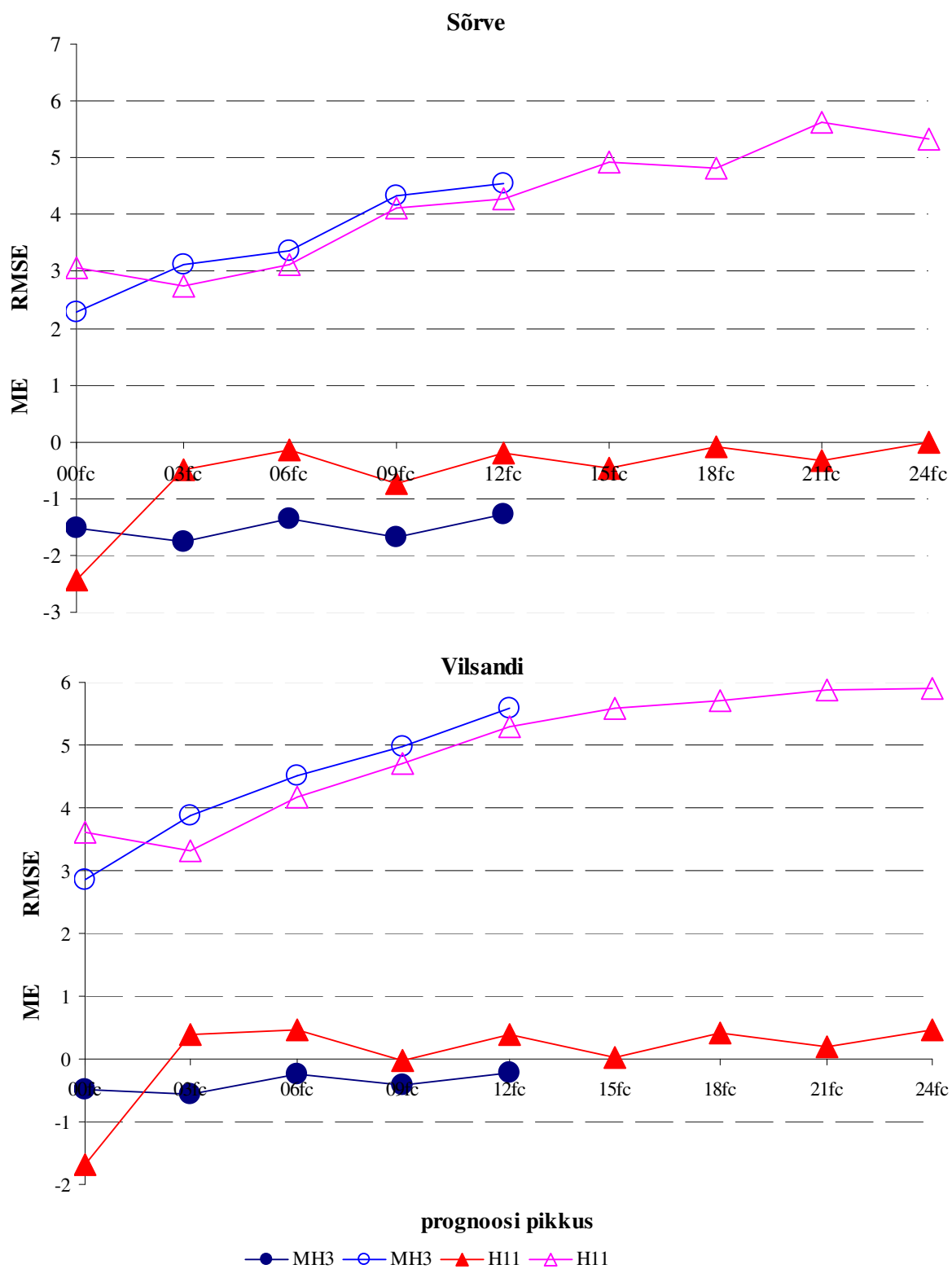


Joonis 4. H11 ja MH3 tuulekiiruse ruutkeskmine (RMSE) ja süstemaatiline (ME) viga Pärnu ja Ristna korral.

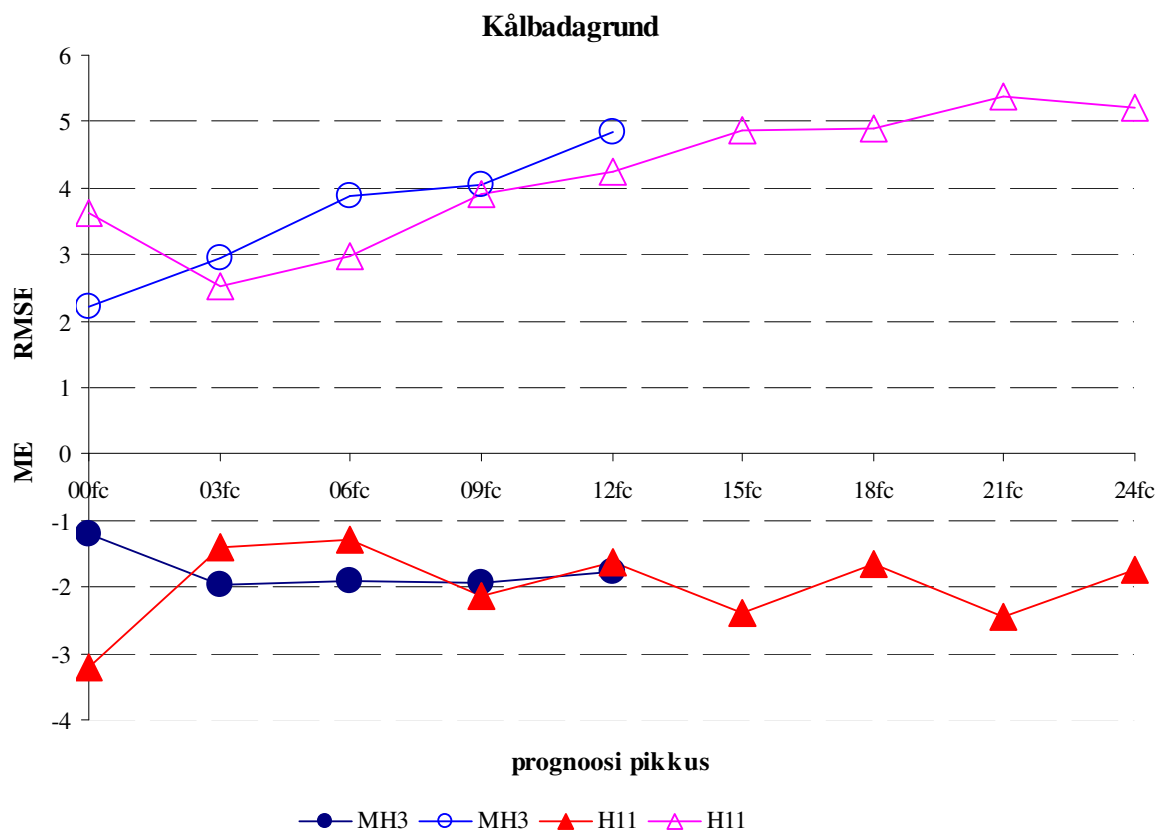
Sõrve puhul oli H11 prognooside ME väärtused nullilähedased (joonis 5). MH3 alahindas vaatlustulemusi sõltuvalt prognoosipikkusest -1.3 - -1.7 m/s. Ruutkeskmise vea väärtused olid väiksemad H11-l, kus 3-tunnise prognoosi puhul oli RMSE = 2.7 m/s ning 24-tunnise prognoosi puhul oli RMSE väärtus kasvanud 5.3 m/s tasemele. MH3 andis 3-tunnise prognoosi RMSE väärtuseks 3.1 m/s ja 12-tunnises prognoosis oli RMSE väärtus 4.6 m/s.

Vilsandi puhul olid mõlemate mudelite prognooside süstemaatiline viga nullilähedane (joonis 5). Kui MH3 veidi alahindas mõõdetud andmeid (ME = -0.2 - -0.4 m/s), siis H11 vastupidiselt veidi ülehindas vaatlusandmeid (ME= 0.4 - 0.5 m/s). Ka siin olid H11 ruutkeskmise vea väärtused väiksemad kui MH3-l. 3-tunnise prognoosi RMSE oli 3.3 m/s ja 24-tunniseks prognoosiks jõudis RMSE 5.9 m/s väärtuseni. MH3 puhul oli RMSE 3-tunnise prognoosi puhul 3.9 m/s ja 12-tunnise prognoosi puhul 5.6 m/s.

Mõlemad mudelid alahindasid Kålbadagrundi vaatlustorni andmeid (joonis 6). Paremini oli H11, mille süstemaatiline viga jäi erinevate prognoosipikkuste juures -1.3 - -2.4 m/s vahele. Siin ilmnis süstemaatilise vea kasvamine pikemate prognoosipikkuste suunas. MH3 alahindas vaatlusandmeid keskmiselt -1.7 - -1.9 m/s. Taas andis paremaid tulemusi prognooside puhul H11, kus RMSE väärtus oli 3-tunnise prognoosi puhul 2.5 m/s ning mis tõusis 24-tunnise prognoosi puhul 5.2 m/s tasemele. MH3 puhul oli RMSE väärtused 3-tunnise prognoosi puhul 2.9 m/s ja 12-tunnise prognoosi puhul 4.9 m/s.



Joonis 5. H11 ja MH3 tuulekiiruse ruutkeskmise (RMSE) ja süstemaatiline (ME) viga Vilsandi ja Sõrve korral.



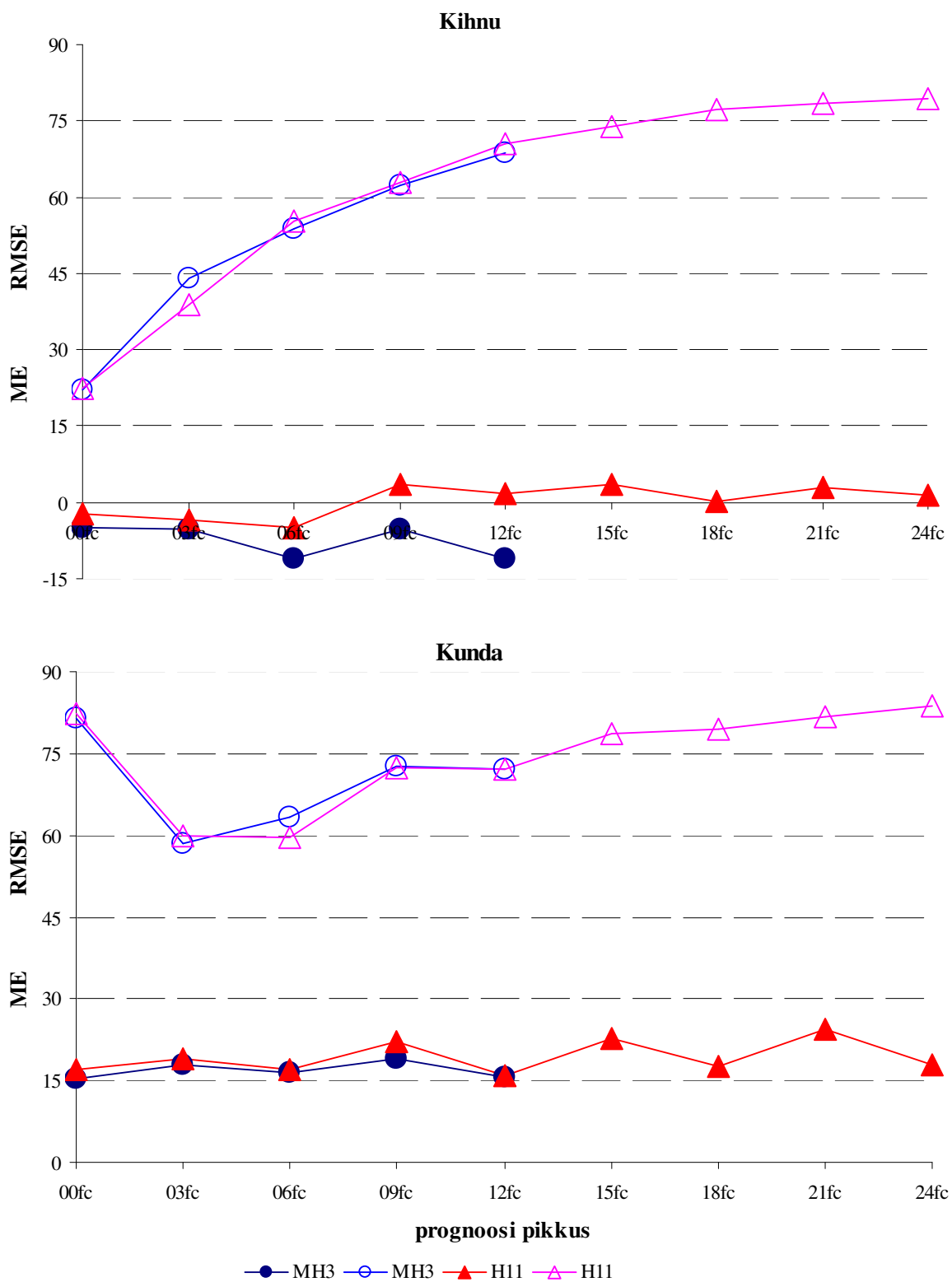
Joonis 6. H11 ja MH3 tuulekiiruse ruutkeskmine (RMSE) ja süstemaatiline (ME) viga Kålbadagrundi korral.

4.2. Mudelite tuulesuuna prognooside hindamine

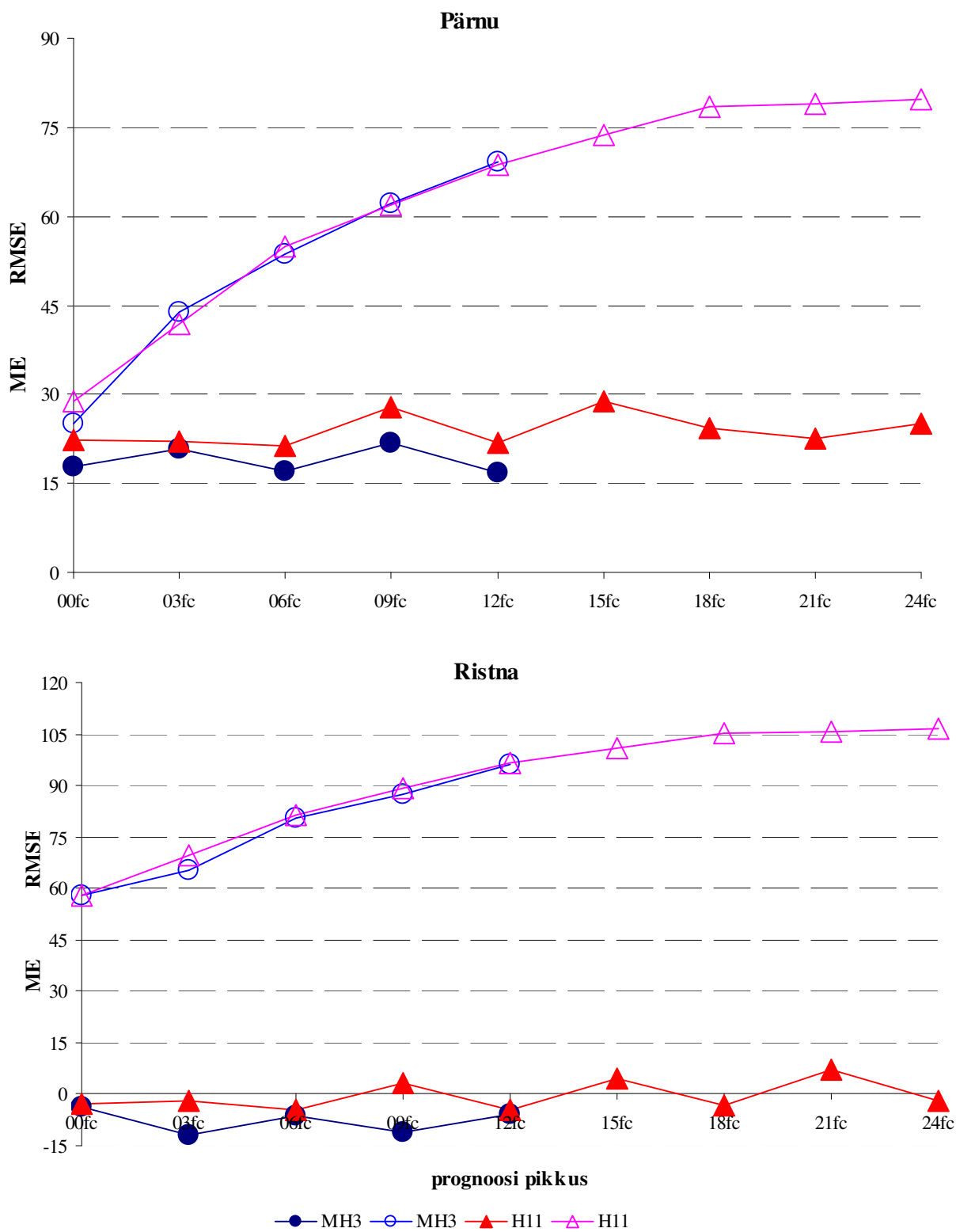
Antud juhul võrreldi mudelite analüüsi ja erineva pikkusega prognooside tuulesuuna andmeid erinevate vaatlusjaamade tuulesuuna andmetega (joonised 7 - 10). Ka tuulesuuna puhul ei ilmnenu mudelite ennustustulemustes kindlaid seaduspärasusi. Siin olid erinevused võrreldes tuulekiirusega mudelite vahel väiksemad. Tuulesuuna süstemaatilise vea puhul peetakse ülehindamise juures silmas seda, et tuulesuunda hinnatakse üle päripäeva suunas. Näiteks kui mudel andis põhjatuule, siis ülehindas ta tuult 45° ehk tegelikult registreeris vaatlusjaam kirdetuule. Tulemuste tabel on antud lisas 2.

Kihnu andmete võrdlemisel mudelandmetega (joonis 7), ilmnis H11 lühema pikkusega prognooside puhul allahindamine (-5°), mis pikemate prognooside juures muutus kergeks ülehindamiseks. Võrreldes H11-ga alahindas tuulesuunda enam MH3, kus süstemaatiline viga jäi erineva pikkusega prognooside puhul -5° - -11° ning allahindamine oli suurem pikemate prognooside puhul. Ruutkeskmise vea käik oli mõlemal mudelil üldiselt samasugune. 3-tunnise prognoosi puhul MH3 ja H11 ruutkeskmised vead erinesid pisut teineteisest, olles MH3 puhul 44° ja H11 puhul 39° . 12-tunnise prognoosi puhul mõlema mudeli ruutkeskmise viga ühtlustus ja oli 70° . H11 24-tunnise prognoosi puhul tõusis RMSE väärtus 79° .

Kunda puhul (joonis 7) esines mõlemal mudelil sarnane vaatlustulemuste ülehindamise tendents. Mõlema mudeli poolt ülehinnati vaatlustulemusi 16° - 24° . H11 3-tunnise prognoosi ruutkeskmise viga oli 60° ning 24-tunnise prognoosi puhul 84° . MH3 ruutkeskmise viga oli 3-tunnise prognoosi puhul 58° ja 12-tunnise prognoosi puhul 72° .



Joonis 7. H11 ja MH3 tuulesuuna ruutkeskmine (RMSE) ja süstemaatiline (ME) viga Kihnu ja Kunda korral.



Joonis 8. H11 ja MH3 tuulesuuna ruutkeskmine (RMSE) ja süstemaatiline (ME) viga Pärnu ja Ristna korral.

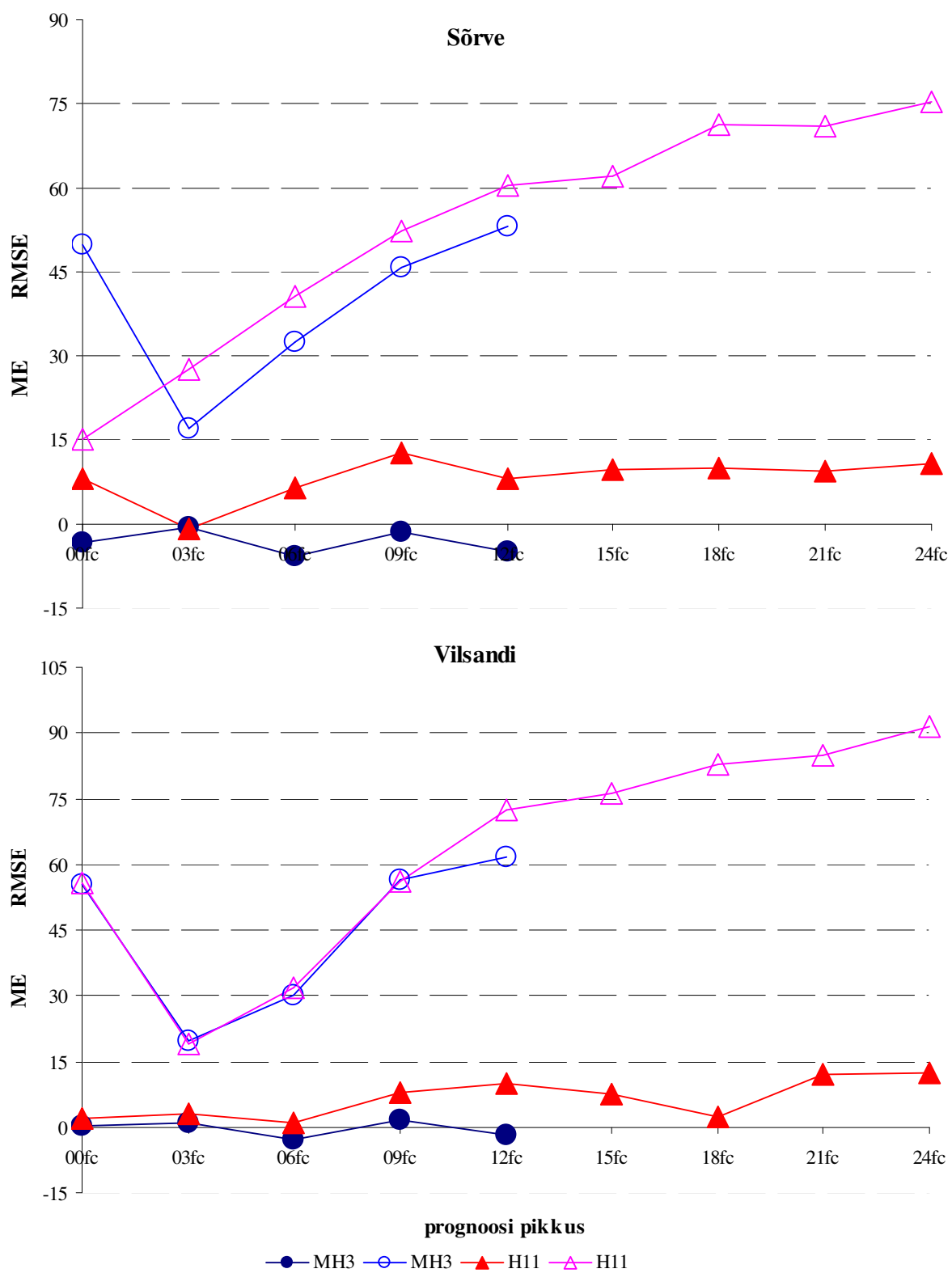
Mudelite tuulesuuna võrdluses Pärnu vaatlusandmetega (joonis 8), ilmnes mudelite poolne tuulesuuna ülehindamine. Vähem ülehindas tuulesuunda MH3, kus süstemaatiline viga oli $17^{\circ} - 22^{\circ}$. H11 ülehindas tuulesuunda rohkem, tema süstemaatilise vea väärtused olid vahemikus $21^{\circ} - 29^{\circ}$. Ruutkeskmise vea puhul andsid mudelid küllaltki sarnaseid tulemusi, 3-tunnise prognoosi puhul on mõlema mudeli RMSE väärtus 42° , mis tõusis H11 24-tunnise prognoosi puhul 80° tasemele.

Ristna puhul (joonis 8) esines mudelversioonide prognoosides teatud allahindamine. H11 hindas tuulesuunda keskmiselt $-2^{\circ} - -5^{\circ}$ alla ja MH3 keskmiselt $-6^{\circ} - -10^{\circ}$. MH3 puhul oli allahindamine suurem 3- ja 9-tunnise prognoosi puhul. Ruutkeskmise vea väärtused olid mõlemal mudelil taas samasugused. Kui 3-tunnise prognoosi puhul oli RMSE väärtuseks 67° , siis H11 24-tunnise prognoosi puhul kasvas RMSE väärtus 106° -ni.

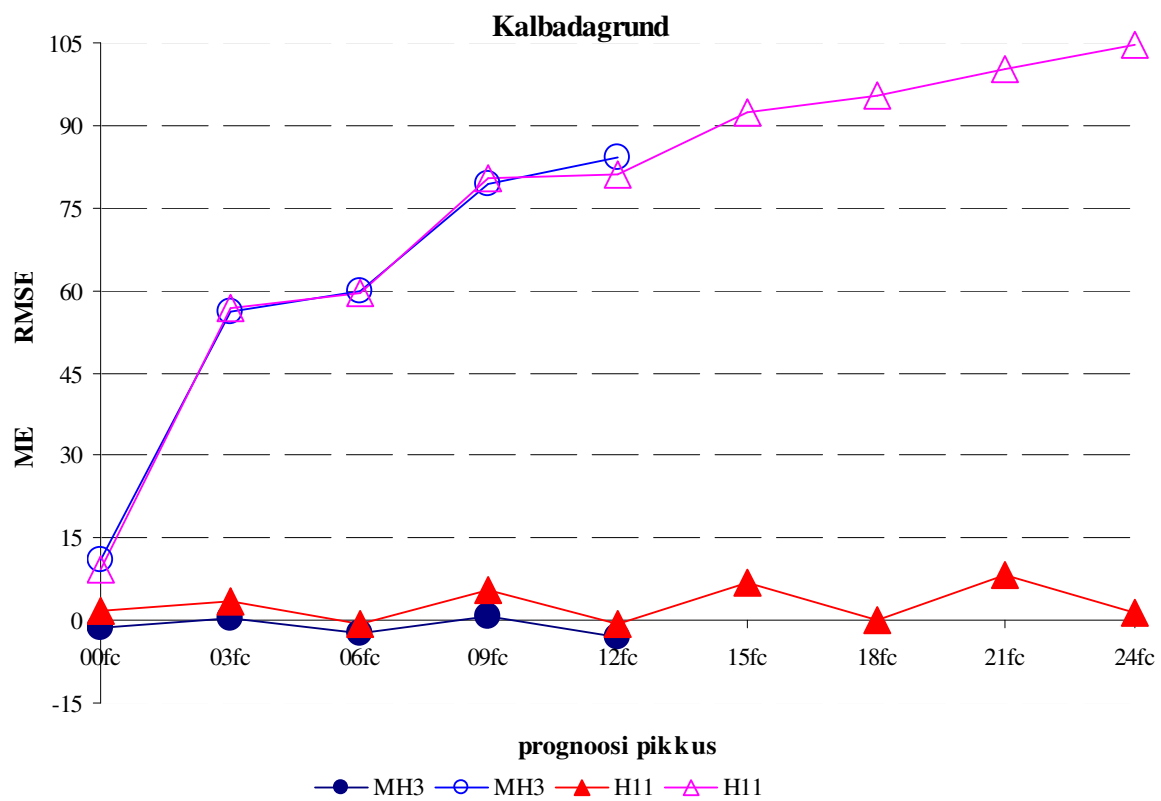
Võrdluses Sõrve tuulesuuna andmetega (joonis 9) erinesid mudelite süstemaatilise kui ruutkeskmise vea väärtused teineteisest. Kui MH3 alahindas vaatlustulemusi erineva pikkusega prognooside juures $-2^{\circ} - -6^{\circ}$, siis H11 puhul jäid süstemaatilise vea väärtused vahemikku $-1 - 11^{\circ}$. Ruutkeskmise vea väärtus oli MH3 3-tunnise prognoosi puhul 17° ja 12-tunnise prognoosi puhul 53° . H11 puhul oli ruutkeskmise viga 3-tunnise prognoosi puhul 27° ja 24-tunniseks prognoosi puhul 75° .

Vilsandi puhul (joonis 9) olid mudelite süstemaatilise vea väärtused nulli lähedal. H11 süstemaatiline viga kasvas pikemate prognooside korral, olles erinevate prognooside juures ülehinnatud $1^{\circ} - 12^{\circ}$. MH3 puhul jäid süstemaatilise vea väärtused erinevate prognoosipikkuste juures nulli lähedale. RMSE väärtused olid mõlema mudeli 3-tunnise prognoosi korral 19° . 12-tunnise prognoosi puhul oli mudelite RMSE väärtuste vahel tekkinud erinevus. MH3 puhul oli ruutkeskmise viga 62° ning H11 puhul vastavalt 73° . H11 24-tunnise prognoosi puhul tõusis RMSE väärtus 92° -ni.

Kalbadagrundi puhul (joonis 10) oli mudelite süstemaatiline viga nullilähedane. Ka ruutkeskmise vea väärtused langesid H11 ja MH3 vahel üldjoones kokku. 3-tunnise prognoosi puhul oli mõlema mudeli korral RMSE 56° , 12-tunnise prognoosi puhul oli H11 RMSE 81° (MH3 12-tunnise prognoosi RMSE vastavalt 84°) ning H11 24-tunnise prognoosi oli RMSE 105° .



Joonis 9. H11 ja MH3 tuulesuuna ruutkeskmise (RMSE) ja süstemaatiline (ME) viga Vilsandi ja Sõrve korral.



Joonis 10. H11 ja MH3 tuulesuuna ruutkeskmise (RMSE) ja süstemaatiline (ME) viga Kålbadagrundi korral.

4.3. Tuulekiiruse süstemaatiline ja ruutkeskmise viga erineva suunajaotuse korral

Järgnevalt analüüsiti mudelite tuulekiiruseid iga jaama kohta eraldi erineva tuulesuuna jaotuse korral (joonised 11 - 17). Lisaks leiti lineaarne korrelatsioonikordaja ja regressioonisirge parameetrid. Kuna peamised erinevused esinesid H11 ja MH3 analüüsides ja 6-tunniste prognooside vahel, siis toodi välja nende võrdlus vaatlusandmetega.

Joonistel on vasakul pool antud H11 analüüs (H11-00fc) ja 6-tunnine prognoos (H11-06fc) ning paremal pool MH3 poolt tehtud analüüs (MH3-00fc) ja MH3 6-tunnine prognoos (MH3-06fc). Sümbolitega on tähistatud:

N – vaatluste arv;

Slope – kalle;

Interc. – vabaliige;

R – korrelatsioonikordaja;

ME – süstemaatiline viga;

RMSE – ruutkeskmise viga;

N, NE, E, SE, S, SW, W, NW – tähistavad klassikalisi tuulesuundi.

Täpsemat teavet on nende sümbolite kohta antud punktis 3.3.

Esitatud joonistel näitab graafiku horisontaaltelg mõõdetud ja vertikaaltelg mudeli poolt analüüsitud/prognoositud tuulekiiruse tulemusi m/s. Kui punktid koonduvad graafiku diagonaalist alla poole on tegemist mudeli poolse tuulekiiruse väärtuste allahindamise e mudeli poolt antud tulemused olid vaadeldud tuulekiiruse väärtustest väiksemad. Kui punktid koonduvad diagonaalist ülespoole on tegemist ülehindamisega e mudeli poolt antud tulemused olid vaadeldud väärtustest suuremad.

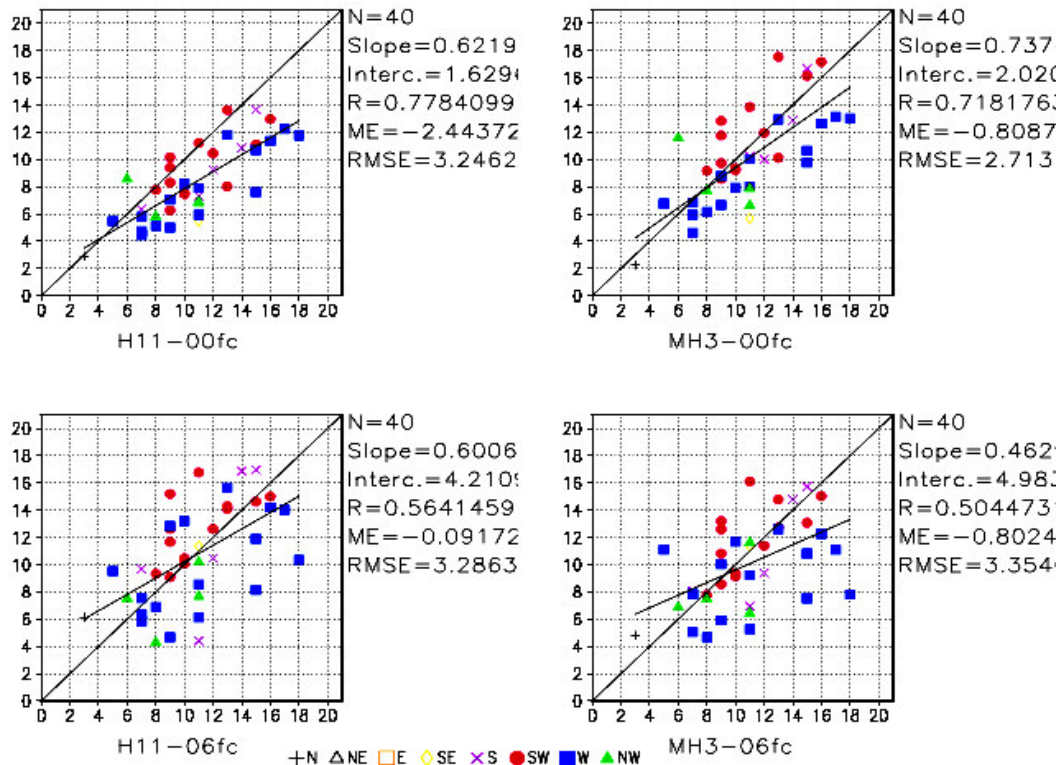
Veel on edaspidises tekstis välja toodud jaotused tuulekiiruse üldisemaks hindamiseks. Nõrgemate tuulte puhul peeti silmas tuulekiiruseid, mille tugevus oli <5 m/s. Tugevate tuulte hulka kuuluvad tuulekiirused, mille väärtus oli >10 m/s. Keskmiste tuulte hulka kuulusid tuuled, mis jäid vahemikku 5 – 10 m/s.

H11 ja MH3 analüüsis eristusid korrelatsioonikordaja (*R*) väärtuste põhjal jaamad, mis olid rohkem tuultele avatud. Nende puhul esines parem korrelatsioon MH3 analüüsitulemustes (Sörve – 0.91, Vilsandi – 0.83, Kålbagrund – 0.9). Ülejäänud jaamade puhul, mis tuultele väga avatud ei olnud, olid analüüsitulemuste ja vaatlusandmete vahel paremad korrelatsioonikordaja väärtused H11 analüüsis (Kihnu – 0.78, Kunda – 0.73, Pärnu – 0.84, Ristna – 0.77). Mudeliversioonide 6-tunniste prognooside puhul, kus korrelatsioon võrreldes analüüsiga oli nõrgem, olid H11 korrelatsioonikordajate tulemused paremad, mis jäid vahemikku 0.53 (Ristna) – 0.77 (Kålbagrund).

4.3.1 Kihnu

H11 analüüsitulemuste puhul (joonis 11 (H11-00fc)) ilmnes allahindamise tendents, mis kasvas suuremate tuulekiiruse väärtuste suunas. Süstemaatiline viga oli -2.4 m/s ning ruutkeskmise viga 3.3 m/s. Peamiselt alahinnati lääne ja lõunakaarest puhuvaid tuuli. 6-tunnise prognoosi puhul kahanes süstemaatilise vea väärtus, kuid

kasvas ruutkeskmise vea väärtus. Kui H11 analüüsis oli selgelt näha mudeli poolset tulemuste allahindamist tugevate tuulte osas, siis 6-tunnise prognoosi (joonis 11 (H11-06fc)) juures paigutusid tulemused ühtlasemalt, mistõttu võrreldes analüüsiga tugevat alla- ega üleennustamise tendentsi ei esinenud.

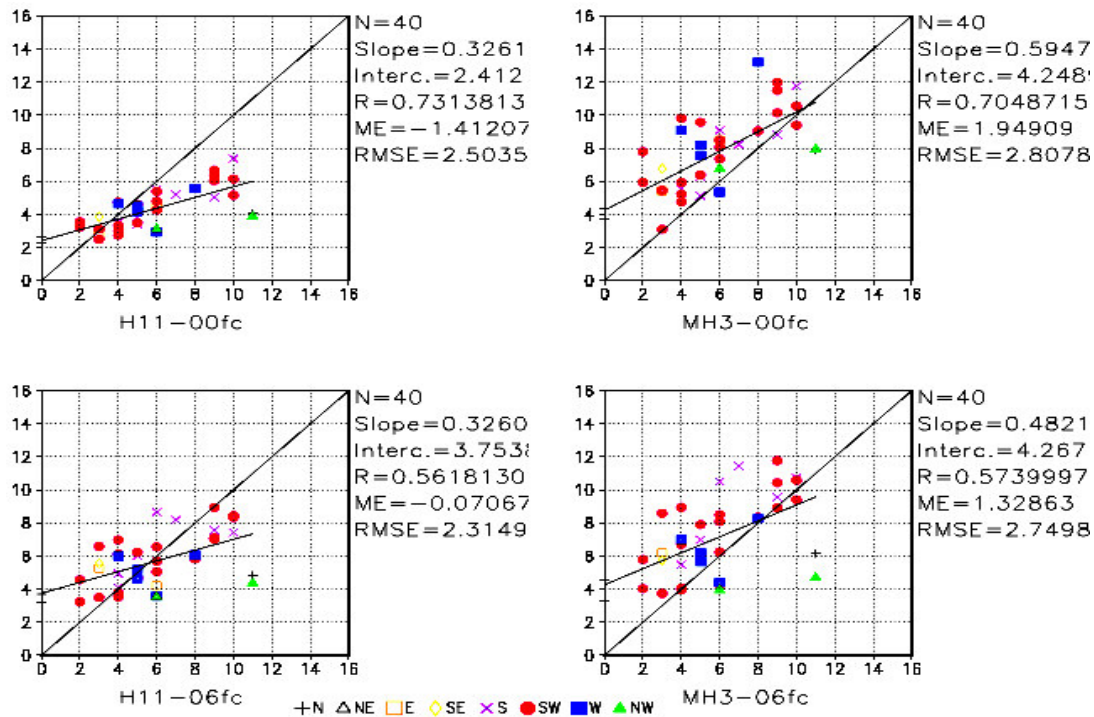


Joonis 11. Kihnu vaatlusandmete võrdlemine H11 ja MH3 analüüsi (00fc) ja 6-tunnise prognoosiga (06fc) erinevate tuulesuundade korral. Horisontaalteljel on antud mõõdetud tuulekiirus (m/s) ja vertikaalteljel analüüsitud/prognoositud tuulekiirus (m/s).

MH3 analüüsi puhul (joonis 11 (MH3-00fc)) olid tulemused H11 analüüsi tulemustest erinevad. Analüüsitud väärtused klappisid vaatlustulemustega suhteliselt hästi, kuigi süstemaatilise vea puhul esines nõrk allahindamine Ruutkeskmise viga oli võrreldes H11 analüüsiga väiksem (2.7 m/s). MH3 6-tunnise prognoosi (joonis 11 (MH3-06fc)) tulemused olid aga võrreldes H11 6-tunnise prognoosiga halvemad. Enam avaldus see tulemuste halvas kokkulangevuses. Ka süstemaatiline viga oli siin suurem, mistõttu mudel alahindas vaatlusi keskmiselt -0.8 m/s. Ruutkeskmise viga oli 3.4 m/s. Jooniselt võib näha, et kohati oli mudeli poolt hinnatud tuulekiiruste väärtused kuni 10 m/s tegelikust väiksemad.

Mudelite tulemuste allahindamine tulenes peamiselt allahinnatud läänetuulest.

4.3.2 Kunda

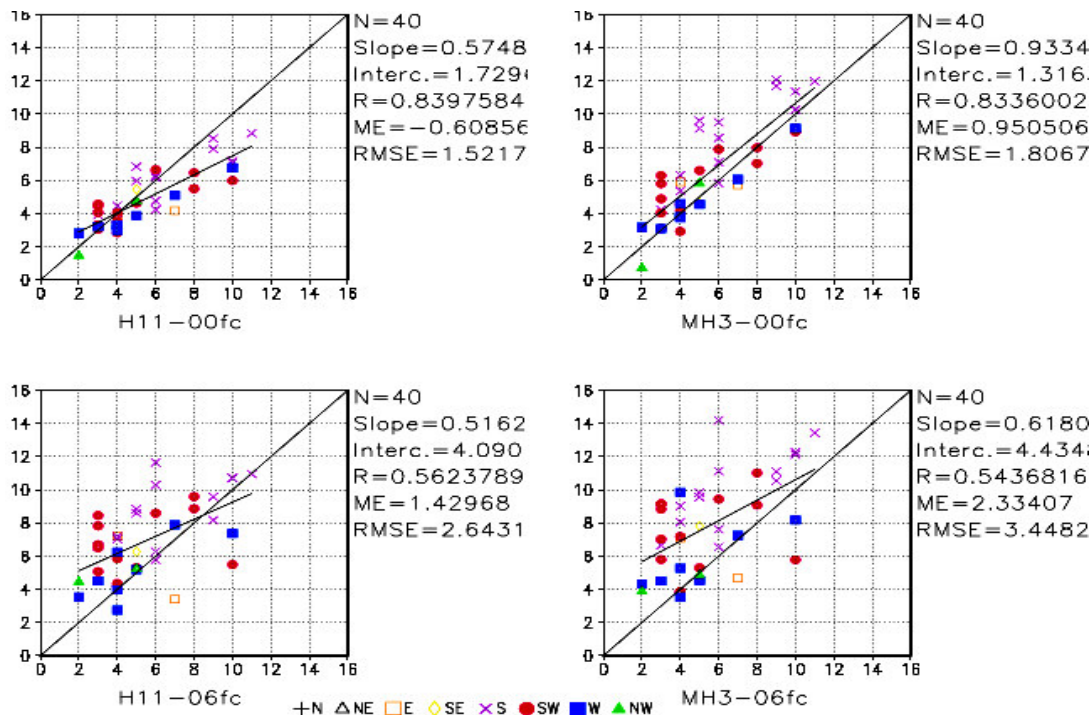


Joonis 12. Kunda vaatlusandmete võrdlemine H11 ja MH3 analüüsi (00fc) ja 6-tunnise prognoosiga (06fc) erinevate tuulesuundade korral. Horisontaalteljel on antud mõõdetud tuulekiirus (m/s) ja vertikaalteljel analüüsitud/prognoositud tuulekiirus (m/s).

Kunda puhul oli näha H11 analüüsis (joonis 12 (H11-00fc)) mudeli poolset allahindamise tendentsi, mis suurenes tuulekiiruse kasvamisega. Süstemaatiline viga oli -1.4 m/s. Analüüsi ruutkeskmise viga oli 2.5 m/s ja üldine kokkulangevus hea. 6-tunnise prognoosi puhul (joonis 12 (H11-06fc)) halvenes prognoosi ja vaatlusandmete kokkulangevus, kuid ülejäänud statistiliste karakteristikute osas olid prognoosi tulemused analüüsitud tulemustest paremad. Siin ilmnas nõrgemate tuulte üleennustamise ja tugevate tuulte allaennustamise tendents. Süstemaatiline viga oli nullilähedane ja ruutkeskmise viga oli 2.3 m/s. Tuulesuundadest oli allahinnatud tuuleks loodetuul, teiste puhul kindlat tendentsi ei eristunud.

MH3 analüüsi puhul (joonis 12 (MH3-00fc)) oli olukord võrreldes H11 analüüsiga vastupidine, kuna siin ilmnas selge vaatluste ülehindamise tendents. Analüüsis hinnati enamasti üle nõrgemaid ja keskmisi tuuli, mis andis süstemaatilise vea väärtuseks 1.9 m/s. Ruutkeskmise viga oli 2.8 m/s. Ka MH3 6-tunnise prognoosi puhul (joonis 12 (MH3-06fc)) hindas mudel üle nõrgemaid tuuli, kuigi võrreldes analüüsiga oli prognoosi tulemus parem. Süstemaatiline viga oli 1.3 m/s ja RMSE 2.7 m/s. Peamisteks tuulesuundadeks, kus MH3 puhul ülehindamist täheldati on lõuna- ja edelatuul.

4.3.3 Pärnu



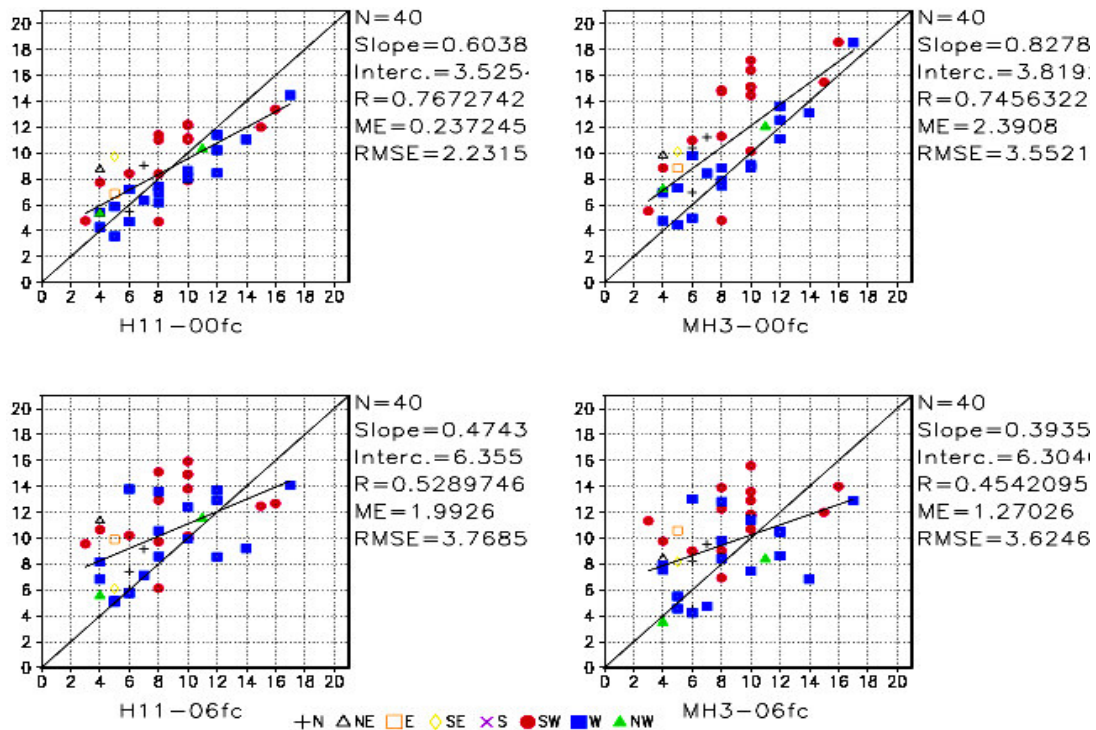
Joonis 13. Pärnu vaatlusandmete võrdlemine H11 ja MH3 analüüsi (00fc) ja 6-tunnise prognoosiga (06fc) erinevate tuulesuundade korral. Horisontaalteljel on antud mõõdetud tuulekiirus (m/s) ja vertikaalteljel analüüsitud/prognoositud tuulekiirus (m/s).

H11 analüüsis (joonis 13 (H11-00fc)) esines tendents keskmiste ja tugevate tuulte allahindamisele, mis kasvas tuulekiiruse suurenemisega. Süstemaatiline viga oli siin -0.6 m/s. H11 analüüsi puhul esines tulemuste suhteliselt hea kokkulangevus, RMSE oli 1.5 m/s. 6-tunnise prognoosi puhul (joonis 13 (H11-06fc)) oli analüüsis leitud allahindamine muutunud ülehindamiseks, seda eelkõige nõrgemate tuulte ennustamisel, süstemaatiline viga oli 1.4 m/s. Võrreldes analüüsiga halvenes siin kokkulangevus ning kasvas ruutkeskmine viga (2.6 m/s).

MH3 analüüsi puhul (joonis 13 (MH3-00fc)) oli näha ühtlast mudeli poolset tuulekiiruse väärtuste üleennustamise tendentsi erineva tugevusega tuulte puhul, mis ei olnud suur (ME = 0.95 m/s). Ruutkeskmine viga oli 1.8 m/s. 6-tunnise MH3 prognoosi puhul (joonis 13 (MH3-06fc)) oli selgemini väljendunud mudeli poolne ülehindamine, seda eriti nõrgemate ja keskmise tugevusega tuulte puhul. Süstemaatiline viga oli 2.3 m/s ja ruutkeskmine viga 3.5 m/s.

Mõlema mudeli puhul oli probleeme lõuna- ja edelatuulte ennustamisega, mida valdavalt ülehinnati (va. H11 analüüs).

4.3.4 Ristna



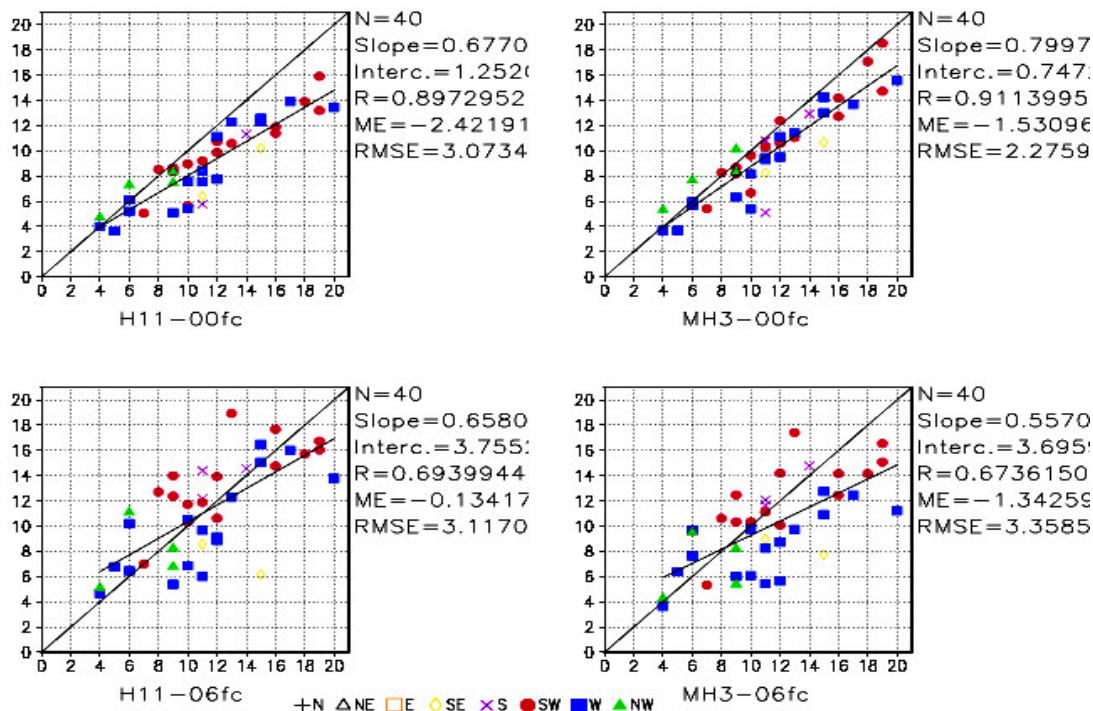
Joonis 14. Ristna vaatlusandmete võrdlemine H11 ja MH3 analüüsi (00fc) ja 6-tunnise prognoosiga (06fc) erinevate tuulesuundade korral. Horisontaalteljel on antud mõõdetud tuulekiirus (m/s) ja vertikaalteljel analüüsitud/prognoositud tuulekiirus (m/s).

H11 analüüs (joonis 14 (H11-00fc)) langes vaatlustulemustega küllaltki hästi kokku. Tugevate tuulte puhul esines märgatav vaatlusandmete allahindamise tendents. Analüüsi ruutkeskmise viga oli 2.2 m/s. H11 6-tunnise prognoosi juures (joonis 14 (H11-06fc)) oli tegemist tulemuste halva kokkulangevusega, samuti ilmnas siin selgelt nõrgemate ja keskmiste tuulekiiruste ülehindamine, süstemaatiline viga oli 2 m/s. Ka ruutkeskmise vea väärtus tuli siin suur, mis oli 3.8 m/s.

MH3 analüüsi puhul (joonis 14 (MH3-00fc)) ilmnas kõigi tuulekiiruste puhul ülehindamine, mis kasvas nõrgemate tuulekiiruste suunas. Süstemaatiline viga oli 2.4 m/s. Samuti oli tegemist halva kokkulangevusega, RMSE oli 3.6 m/s. Kui võrreldes MH3 analüüsiga kahanes 6-tunnise prognoosi (joonis 14 (MH3-06fc)) süstemaatiline viga (1.3 m/s), siis ülejäänud statistiliste karakteristikute tulemused halvenesid. Ruutkeskmise viga oli 3.6 m/s.

Tuulesuundadest tekitas mudeliversioonidele enim probleeme edelatuul, mida ülehinnati MH3 analüüsis ja prognoosis ning H11 prognoosis.

4.3.5 Sõrve



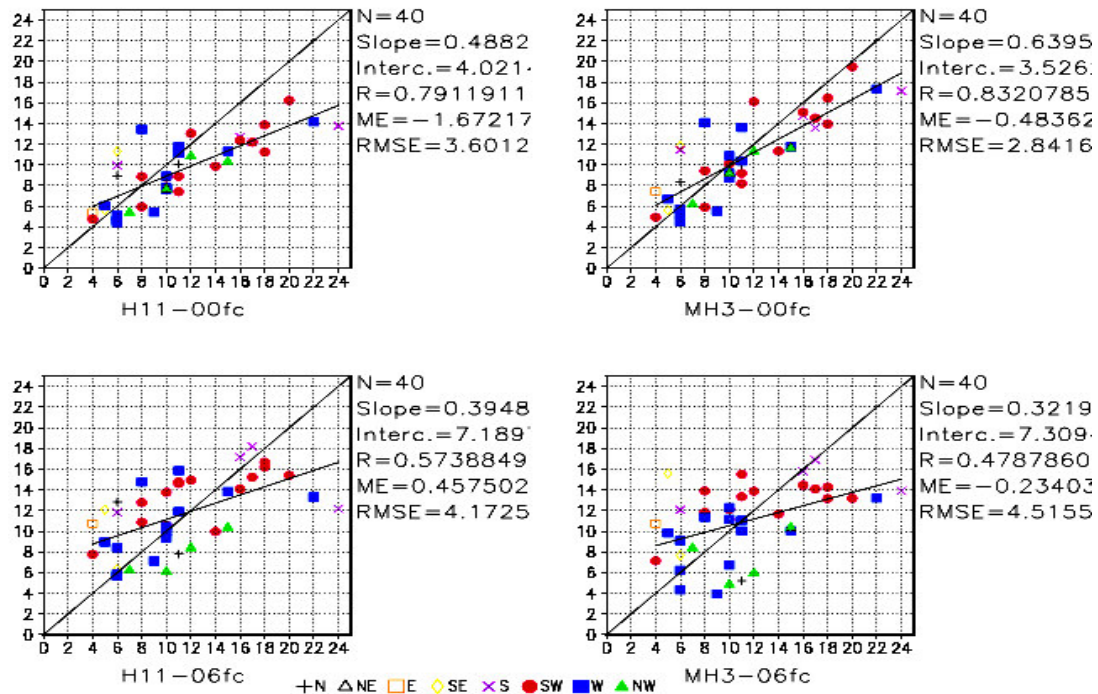
Joonis 15. Sõrve vaatlusandmete võrdlemine H11 ja MH3 analüüsi (00fc) ja 6-tunnise prognoosiga (06fc) erinevate tuulesuundade korral. Horisontaalteljel on antud mõõdetud tuulekiirus (m/s) ja vertikaalteljel analüüsitud/prognoositud tuulekiirus (m/s).

H11 analüüsis (joonis 15 (H11-00fc)) alahinnati keskmisi ja tugevaid tuuli ning allahindamine tendents kasvas suuremate tuulekiiruste suunas. Süstemaatiline viga oli -2.4 m/s ja ruutkeskmine viga 3.1 m/s. 6-tunnise ennustuse puhul (joonis 15 (H11-06fc)) esines nõrgemate tuulte ülehindamise ning tugevate tuulte allahindamise tendents. Süstemaatiline viga näitas väikest allahindamist (-0.1 m/s). Ruutkeskmine viga oli analüüsiga sama.

MH3 analüüsi puhul (joonis 15 (MH3-00fc)) ilmnes võrreldes H11 analüüsiga parem tulemus, kuigi üldine tendents oli sarnane ehk mudel alahindas vaatlustulemusi ning allahindamise tendents kasvas tugevate tuulte suunas. Süstemaatiline viga oli -1.5 m/s ja ruutkeskmine viga 2.3 m/s. 6-tunnise ennustuse puhul (joonis 15 (MH3-06fc)) paranes mudeli süstemaatiline viga väärtus (-1.3 m/s), kuid halvenesid ülejäänud statistiliste karakteristikute väärtused. Üldiselt ilmnes ka siin tugevate tuulte puhul allahindamise tendents.

Tuulesuundadest alahinnati analüüsides peale loodetuule kõiki teisi suundi. 6-tunniste prognooside puhul hinnati valdavalt tegelikkusest nõrgemaks läänetuult.

4.3.6 Vilsandi



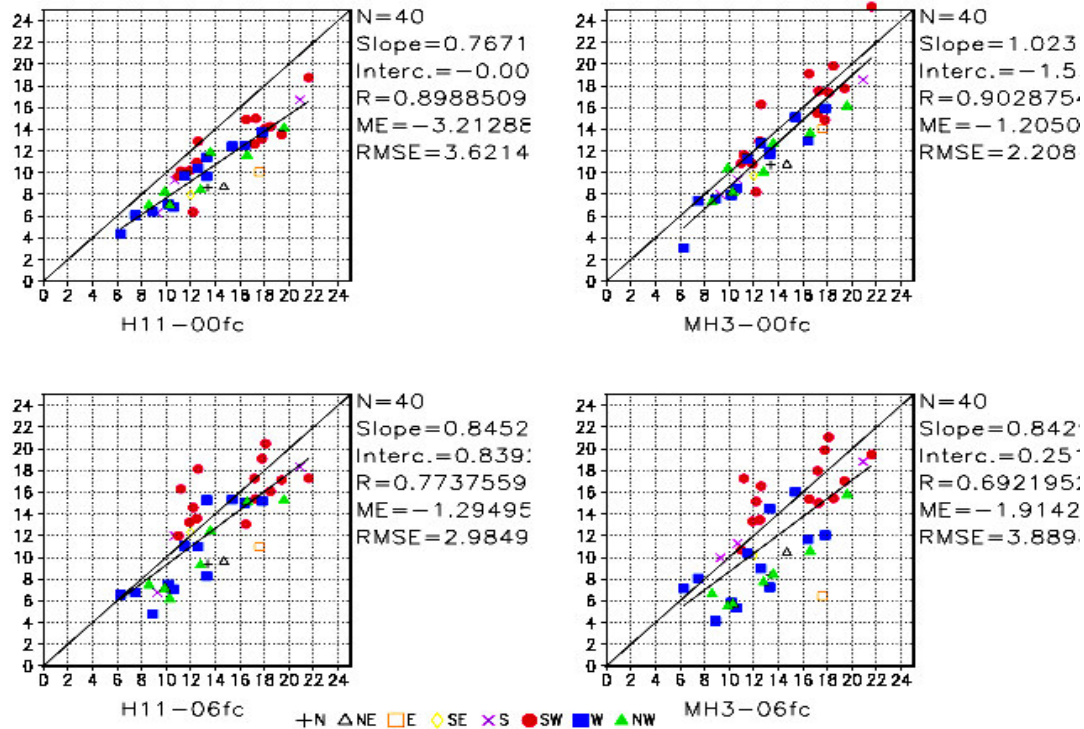
Joonis 16. Vilsandi vaatlusandmete võrdlemine H11 ja MH3 analüüsi (00fc) ja 6-tunnise prognoosiga (06fc) erinevate tuulesuundade korral. Horisontaalteljel on antud mõõdetud tuulekiirus (m/s) ja vertikaalteljel analüüsitud/prognoositud tuulekiirus (m/s).

Vilsandi puhul esines H11 analüüsis (joonis 16 (H11-00fc)) selge tugevate tuulte allahindamise tendents, mis kajastus ka süstemaatilise vea väärtuse puhul (-1.7 m/s). Ruutkeskmine viga oli seevastu suur (3.6 m/s). 6-tunnise prognoosi puhul (joonis 16 (H11-06fc)) paigutusid tulemused võrreldes analüüsitulemustega paremini. Üldiselt ilmnes tendents nõrgemate tuulte üleennustamisele ning tugevate tuulte allaennustamisele. Süstemaatiline viga (0.5 m/s) näitas kokkuvõttes teatud ülehindamise tendentsi. Ruutkeskmine viga oli võrreldes analüüsiga veelgi kasvanud (4.2 m/s).

MH3 analüüsi (joonis 16 (MH3-00fc)) tulemused olid võrreldes H11-ga pisut paremad. Antud juhul oli tugevate tuulte allahindamise tendents, mis kasvas tugevamate tuulekiiruste suunas, väljendunud võrreldes H11 analüüsiga nõrgemalt. Süstemaatiline viga oli -0.5 m/s ja ruutkeskmine viga 2.8 m/s. Ka 6-tunnise ennustuse puhul (joonis 16 (MH3-06fc)) langes MH3 tulemuste tendents H11-ga kokku, kuigi üldiselt oli pilt võrreldes H11 prognoosiga halvem. Tendentsi järgi alahinnati tugevaid tuuli ning ülehinnati nõrgemaid tuuli. Süstemaatilise viga oli -0.2 m/s, mis näitas kokkuvõttes väikest allahindamist. Ka paigutusid mudeli tulemused suhteliselt hajusalt, mistõttu oli ruutkeskmise vea väärtus 4.5 m/s.

Tuulesuundade puhul ei eristunud ühegi suuna puhul ilmselget üle- ega allahindamist.

4.3.7 Kålbagrund



Joonis 17. Kålbagrundi vaatlusandmete võrdlemine H11 ja MH3 analüüsi (00fc) ja 6-tunnise prognoosiga (06fc) erinevate tuulesuundade korral. Horisontaalteljel on antud mõõdetud tuulekiirus (m/s) ja vertikaalteljel analüüsitud/prognoositud tuulekiirus (m/s).

H11 analüüsi puhul (joonis 17 (H11-00fc)) oli tegemist pideva mudeli poolse allahindamise tendentsiga, mis kasvas tugevama tuulekiiruse suunas. Sellest oli tingitud ka suhteliselt suur süstemaatiline viga (-3.2 m/s), samas kui tulemuste üldine kokkulangevus oli hea. Ruutkeskmine viga oli 3.6 m/s. Ka 6-tunnise ennustuse puhul (joonis 17 (H11-06fc)) esines allahindamise tendents, mis kasvas tugevamate tuulekiiruse väärtuste suunas. Kuid siin paigutusid mudeli poolt ennustatud tulemused vaadeldud tulemustega paremini kokku. Süstemaatiline viga oli -1.3 m/s. Ka tulemuste ruutkeskmine viga (3 m/s) oli võrreldes analüüsitud tulemusega tublisti paranenud.

MH3 analüüsi (joonis 17 (MH3-00fc)) puhul esines kõigi tuulekiiruse väärtuste puhul samasugune allahindamise tendents, mis oli keskmisest süstemaatilise vea väärtusest tulenedes -1.2 m/s. Suhteliselt hea oli mudeli ja vaadeldud tulemuste kokkulangevus, ruutkeskmise viga oli 2.2 m/s. Ka MH3 analüüsi puhul esines hea tulemuste kokkulangevus. MH3 6-tunnise ennustuse puhul (joonis 17 (MH3-06fc)) ilmnes allahindamise tendentsi kasv tugevamate tuulte suunas. Sellest tulenes suurem süstemaatiline viga, mis oli -1.9 m/s. Ka teiste statistiliste karakteristikute puhul olid 6-tunnise prognoosi tulemused võrreldes analüüsiga kehvemad. Ruutkeskmine viga oli 3.9 m/s.

Tuulesuundadest alahinnati kõigil juhtudel loodetuult, teiste suundade puhul kindlat tendentsi ei esinenud, va. H11 analüüsi puhul, kus olid allahinnatud kõigist ilmakaartest puhuvad tuuled.

4.4. H11 ja MH3 vahelised erinevused

Käesoleval juhul võrreldi mudeliversioonide antud ajaperioodi (27.11.1999 - 06.12.1999) kohta keskmistatud tuulevälju, mis ekstrapoleeriti mudeli alumisest tasemest 10 m kõrgusele aluspinnast (joonis 18). Põhjus miks keskmistatud tuuleväljad esitati 10 m kõrgusel aluspinnast, tulenes sellest, et kõigi jaamade poolt, va. Kålbadagrund, tehti mõõtmised 10 m kõrgusel aluspinnast. Lisas 2 on välja toodud sarnane joonis mudeli alumise taseme (30 m) tuuleväljade kohta.

Joonisel 18 on vasakul pool esitatud hüdrostaatilise mudeli analüüs ja 6-tunnine prognoos ning paremal pool vastavalt mittehüdrostaatilise mudeli analüüs ja 6-tunnine prognoos. Vaatlusjaamade nimede taha on sulgudesse märgitud vastavas vaatlusjaamas mõõdetud antud ajaperioodi keskmine tuulekiiruse väärtus.

Võrreldes tuulevälju mudelite alumistel tasemetel, ilmnes mudeli versioonide vahel teatud erinevusi, mis olid eelkõige tingitud erineva lahutuse kasutamisest. Seetõttu oli MH3 keskmise väärtusega tuulekiiruse alad esitatud detailsemalt kui H11 puhul. Tuulesuuna puhul, mis on joonistel esitatud nooltega, mudelite analüüsides ega prognoosides vahel suuri erinevusi ei ilmnenud. Kõigil joonistel ilmnes valdavalt lääne- ja edelatuule käik.

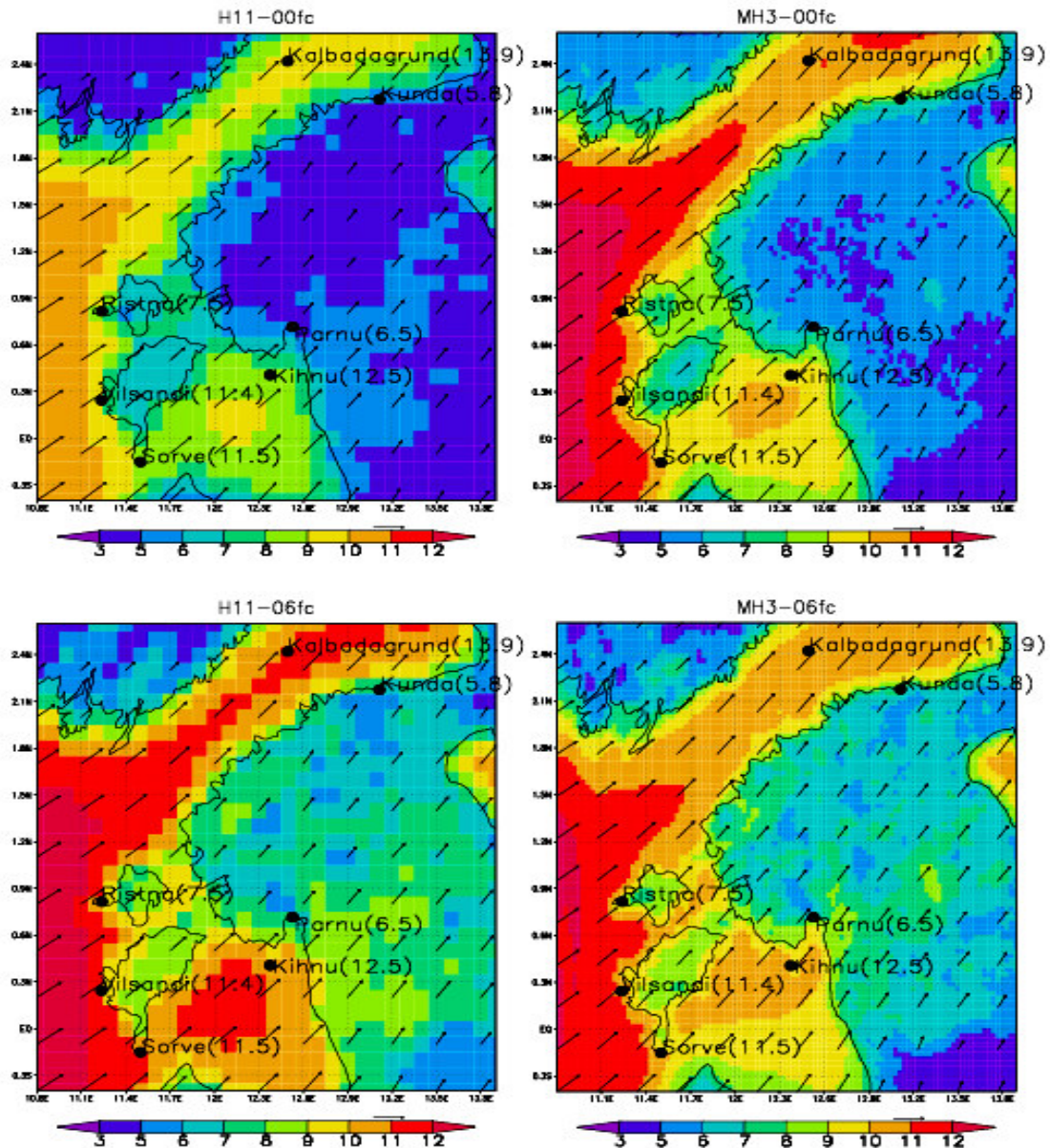
Üldiselt võis tuulekiiruse horisontaalse muutumise puhul märgata tuulekiiruste väärtuste nõrgenemist merelt mandrile siirdumisel (Läänemerelt Sise-Eesti suunal). Nii kulges >11 m/s tuulekiiruste piir Eesti saarte ranniku lähedalt, kus tuulekiiruse väärtused kasvasid avamere suunas. Ka avaldus selline ala sõltuvalt mudeliversioonist (H11-06fc, MH3-00fc) Soome lahe kesk- ja idaosas ning Liivi lahes (H11-06fc). 9 – 11 m/s tuulekiiruste ala hõlmas väiksemad saared (Kihnu jne.) ja poolsaared ning ulatus kohati mandrilegi (Edela-Eesti). Veel avaldus selline tuulekiiruse väärtuste ala Peipsi järvel. 6-9 m/s tuulekiirustega ala võttis enda alla suuremate saarte siseosa (Saaremaa, Hiiumaa) ning mandril rannikult u. 10 – 30 km sisemaa suunas. Antud ala hõlmas veel Peipsi järve kaldaalad ja Võrtsjärve. <6 m/s tuulekiiruste ala jäi eelkõige Mandri-Eesti siseossa, ulatudes mõnes kohas ka rannikuni (Pärnu).

Teatud erinevused ilmnesid nii analüüsitud ja prognoositud tuuleväljade, kui hüdrostaatilise ja mittehüdrostaatilise mudeliversiooni vahel. H11 poolt analüüsitud tuulekiiruste väli (joonis 18 (H11-00fc)) erines teistest rohkem, kuna siin olid võrreldes teiste esitatud tulemustega tuulekiiruste väärtused üldiselt väiksemad. Võrreldes H11 6-tunnise prognoosiga olid analüüsis tuulekiiruste väärtused kohati 3 - 4 m/s väiksemad. Analüüsi selline käik oli tingitud optimaalse interpoleerimise meetodist (vt. peatükk 1.8.2), mille tõttu esinesid analüüsis prognoosidega ning enamasti ka vaatlustulemustega võrreldes (peatükid 4.1 - 4.3) väiksemad väärtused.

MH3 poolt analüüsitud tuulevälja puhul (joonis 18 (MH3-00fc)), ilmnes võrreldes H11 analüüsitud tuuleväljaga realistlikum tuulekiiruste pilt. H11 analüüsiga võrreldes erines MH3 analüüs eelkõige suurema lahutuse (nt. Võrtsjärv) ja tuulekiiruste suuremate väärtuste tõttu. Võrreldes H11 ja MH3 6-tunniste prognoosidega oli MH3 analüüsis keskmiste tuulekiiruste väärtuste üleminek nõrgematele tuulekiirustele sisemaa suunas selgemini avaldunud ning sisemaal olid tuulekiiruste väärtused nõrgemad (Kesk-, Ida- ja Lõuna-Eesti).

6-tunniste prognoosid erinesid analüüsides eelkõige seetõttu, et nende puhul olid sisemaal ja lahtedes tekkinud kindla tuulekiirusega tsoonid ehk sisemaal puudus selgelt

väljendunud üleminek nõrgemate tuulekiiruste suunas. Näiteks võib tuua Väinamere ala, kus on vastavalt aluspinna iseloomule keskmiselt välja kujunenud suurem või väiksem tuulekiiruse väärtus. Sise-Eestis avalduvad nõrgemate tuulte tsoonid Pärnu lähedal, Ida-Virumaal, Kagu-Eestis, Pandiveres jne. H11 ja MH3 6-tunnise prognoosi erinevus tuleneb eelkõige erineva lahutuse kasutamisest.



Joonis 18. H11 ja MH3 analüüside ning 6-tunnise prognooside 10-päevased keskmistatud tuuleväljad mudeli alumisest tasemest ekstrapoleeritud 10 m kõrgusel aluspinnast.

Kokkuvõte

Käesolev magistritöö on valminud Eesti Meteoroloogia ja Hüdroloogia Instituudis (EMHI) HIRLAM mudeli tundmaõppimise ja katsetamise käigus. Töö teoreetiline osa põhineb HIRLAM-iga kaasas olnud abimaterjalil, kirjandusel ja Internetist saada oleval informatsioonil. Mudeleksperimentide läbiviimisel kasutati algselt Tõravere observatooriumis asuvat 8 protsessorist koosnevat klasterarvutit, hiljem EMHI-s üles seatud 12 arvutist koosnevat klasterarvutit.

Magistritöö esimestes peatükkides antakse ülevaade ilmaprognoosimudelitest. Kõigepealt antakse numbrilise modelleerimise ajalooline ülevaade ning numbriliste mudelite klassifikatsioon. Lisaks on välja toodud ja kirjeldatud mudelite peamisi protsesse. Peamiste numbriliste ilmaennustusmudelite protsesside juures on kirjeldatud dünaamikaosa, kus on lähemalt välja toodud dünaamikavõrrandid, diskretiseerimine, numbrilised meetodid ja mittehüdrostaatiline dünaamika. Füüsikalise parametrizeerimise juures on antud lähem ülevaade mõnedest olulisematest füüsikalistest protsessidest nagu päikesekiirgus, aluspinna protsessid, turbulentsus, konvektsioon jne. Andmete assimilatsiooni juures räägitakse vaatlustest ja nende põhilistest allikatest, taustväljast, assimilatsiooni meetoditest jne.

Atmosfäärimudelitest on eraldi antud ülevaade piiratud ala ilmaennustusmudelile HIRLAM. Lisaks kirjeldatakse HIRLAM mudeli juures põhilisi kasutatavaid numbrilisi skeeme dünaamika, füüsika ja andmete assimilatsiooni juures. Antud on ka üldine HIRLAM tehniline kirjeldus, kus kirjeldatakse millistel masinatel on võimalik HIRLAM mudelit kasutada ning milliseid andmeformaate kasutatakse mudeli sisendi ja väljundi puhul. Samuti on siin välja toodud EMHI-s ilmaprognooside arvutamiseks kasutatav arvutuskeskkond EMHI klatri näol.

Antud töö peamiseks eesmärgiks oli numbrilise ilmaennustusmudeli HIRLAM erineva lahutusega hüdrostaatiliselt ja mittehüdrostaatiliselt versiooni tuuleparameetrite hindamine Eesti rannikualadel ja saartel ning peamiste erinevuste väljatoomine vaatlusandmete ja mudelite ning mõlema mudelversiooni endi vahel. Selleks valiti välja 10-päevane periood novembri lõpust detsembri alguseni (27.11.1999 – 06.12.1999), kus sügiselt talvele üleminekuperioodil esines küllaltki vahelduvad ilmastikutingimused. Antud perioodi käitati kahe erineva lahutuse ja dünaamilise arvutuspaketiga mudelversiooniga. Esimesel juhul oli tegemist kõrge lahutusega (võrgusamm 11 km) hüdrostaatiliselt mudeliga (H11) ning teisel juhul väga kõrge lahutusega (võrgusamm 3.3 km) mittehüdrostaatiliselt mudeliga (MH3).

Peale mudelversioonide käitamist võrreldi saadud mudelite analüüsi ja erineva pikkusega prognooside andmeid seitsme vaatluskoha andmetega. Vaatluskohtadeks oli valitud kuus Eesti vaatlusjaama (Kihnu, Kunda, Pärnu, Ristna, Sõrve, Vilsandi) ja üks Soome vaatlustorn (Kålbådagrund). Erineva pikkusega prognoosideks oli H11 puhul analüüsist 3-tunnise intervalliga kuni 24-tunnise prognoosini ning MH3 puhul analüüsist 3-tunnise intervalliga kuni 12-tunnise prognoosini.

Lisaks võrreldi mudelite analüüsi ja 6-tunnist prognoosi vaatlusandmetega erineva tuulesuuna jaotuse puhul. Tuulesuuna jaotuse puhul kasutati klassikalisi tuulesuundi: N, NE, E, SE, S, SW, W, NW. Siin leiti veel mudeliversioonide ja vaatlustulemuste vahel korrelatsioonikordaja ja regressiooniparameetrid.

Lõpuks võrreldi mudelite analüüsi ja 6-tunnise prognoosi antud ajaperioodil keskmistatud tuulevälju veel omavahel mudeli alumisest tasemest ekstrapoleeritud 10 m kõrgusel.

Tulemuste analüüsist selgus:

- 1) MH3 käitamise puhul ilmnesid erinevad probleemid: CFL kitsendus, puudulik kliima andmebaas, skaleerimisest tulenevad piirangud, väike arvutusvõimsus;
- 2) Optimaalse interpoleerimisskeemi kasutamine tõi H11 analüüsis välja allahinnatud tuuleväljad. Samas esinesid võrreldes MH3-ga realistlikumad tuulekiiruse väärtused analüüsile järgnevates prognoosides;
- 3) H11 tuulekiiruse prognooside puhul esinesid väiksemad süstemaatilise ja ruutkeskmise vea väärtused kui MH3 prognooside puhul ja Ristna;
- 4) Tuulesuuna puhul oli MH3 süstemaatilise vea väärtused väiksemaid kui H11-l. Ruutkeskmise vea puhul langesid mudelite tulemused erinevate prognoosipikkuste juures üldiselt kokku ja Sõrve;
- 5) Mõlema mudeli puhul ilmnes nõrgemate tuulte ülehindamise ja tugevamate tuulte allahindamise tendents, va. Kålbagrund, kus mudelid alahindasid vaatlustulemusi;
- 6) Mudelid ülehindasid tuulekiirust neis jaamades, mis olid tuulesuundadele vähem avatud (Pärnu, Ristna), andsid tuulekiiruse enamvähem õigesti lagedal rannikul paiknevates jaamades (Kihnu, Kunda, Sõrve, Vilsandi) ning alahindasid tuulekiirust avamerel (Kålbagrund);
- 7) MH3 eelis H11 ees ilmnes tänu suurema lahutuse kasutamisele. Mittehüdrostaatilise dünaamika puhul ei sobinud siia hästi valitud ajaperiood (peamiselt advektatsioonist põhjustatud ilmastikuprotsessid) ning ka valitud ala, kuna Eesti tasase pinnamoe juures vertikaalsed protsessid hästi ei avaldunud.

Kasutatud kirjandus

- Ansper, I. 1999. *Ülevaade aluspinna protsesside modelleerimisest HIRLAM-is ja eksperimentid mudeli tundlikkuse määramiseks mulla niiskuse parameetrite suhtes*. Diplomitöö. Eesti Merehariduskeskus. Tallinn.
- Ansper, I. 2001. *HIRLAM-mudeli tuuleprognoosi hindamine ja kasutamine Läänemereel*. Bakalaureusetöö. Tallinna Pedagoogikaülikool. Tallinn.
- Ansper, I., Fortelius, C. 2001. *Verification of HIRLAM marine wind forecasts in the Baltic* - Third Study Conference on Baltex 2-6 July 2001, No. 20, 7-8.
- Ansper, I., Fortelius, C. 2003. *HIRLAM-mudeli tuuleprognooside hindamine Läänemereel*. – Uurimusi Eesti kliimast- Publicationes Instituti Geographici Universitatis Tartuensis, 93, 195-205.
- Bouttier, F., Courtier, P., 1999. *Data assimilation concepts and methods*, http://www.ecmwf.int/newsevents/training/course_notes/DATA_ASSIMILATION/ASSIM_CONCEPTS/Assim_concepts.html
- Browning, K.A., Gurney, R.J., 1999. *Global energy and water cycles*. - Cambridge University Press, Cambridge.
- Charnock, H., 1955. *Wind stress on a water surface*. - Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society., 81, 639-640.
- Cuxart, J., Bougeault, P., Redelsperger, J.-L., 2000. *A turbulence scheme allowing for mesoscale and large-eddy simulations* – Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. 126, 1-30.
- Daley, R., 1991. *Atmospheric Data Analysis* – Cambridge University Press, Cambridge.
- Eerola, K., 1999. *The new operational HIRLAM at the FMI*, <Http://www.fmi.fi/TUT/MET/hirlam/asm2000/juttu.html>
- Haataja, J., Savolainen V., 2000. *Cray T3E User's Guide* – Picaset Oy, Helsinki.
- Heiskanen, M., Frisk M., 1998. *EndWind and Wind Speed Corrections*. Käsikiri FMIs.
- HIRLAM Newsletter No 43. 2003.
- HIRLAM Newsletter No 44. 2003.
- Holton, J.R., 1992. *An Introduction to Dynamic Meteorology* – Academic Press, New York.

- Kiviste, A., 1999. *Matemaatiline statistika MS Exceli keskkonnas* – GT Tarkvara OÜ, Tallinn.
- Jacobs, W., 2003. *Design, Products and Operational Use of the NWP Model-Chain of the DWD* – rahvusvahelise õppeseminari materjal 10-14.03.2003, Langen, Germany
- Källen, E., 1996. *Hirlam Documental Manual*.
- Kull, A., 1996. *Eesti tuuleatlas* – Magistritöö, Tartu Ülikool Geograafia Instituut, Tartu.
- Laigna, K., 2003. *Kõrgema matemaatika põhiteadmised rakendusspetsialistidele ja üliõpilastele* – Teadusloome OÜ, Tallinn.
- Lynch, P., McGrath R., McDonald A., 1999. *Digital Filter Initialization for HIRLAM* – HIRLAM Technical Report. No. 22.
- Männik, A., Rõõm, R., 2001. *Nonhydrostatic adiabatic kernel for HIRLAM. Part II.* – HIRLAM Technical Report. No 49.
- Niklus, I., 2000. *Ilmasituatsiooni analüüs numbrilise ilmaennustusmudeliga HIRLAM*. Bakalaureusetöö. Tartu Ülikool. Tartu.
- Nurmi, P., Heiskanen, M., Arvola, E., Frisk, M. 2000. *Forecast Verification Report winter 1999-2000* – FMI Application Development, Helsinki.
- NWP Course EuroMET, 1997. <http://www.Euromet.met.as.uk/>. EuroMET Consortium.
- Pielke A.R., Pearce P.R., 1994. *Mesoscale Modeling of the Atmosphere* – American Meteorological Society, Boston.
- Post, P., 1994. *Füüsikaline Klimatoloogia* – Tartu Ülikool & Eesti Merehariduskeskus, Tartu.
- Roomets, S., 2003. *Statistika algkursus* – Kolmas ümbertöötatud trükk, Tallinn.
- Rontu, L., Sattler, K., Sigg, R., 2002. *Parametrisation of subgrid-scale orography effects in HIRLAM* – HIRLAM Technical Report. No. 56.
- Rõõm, R., 2001. *Nonhydrostatic adiabatic kernel for HIRLAM, part I* – HIRLAM Technical Report. No 48.
- Rõõm, R., Männik, A., 2002. *Non-hydrostatic adiabatic kernel for HIRLAM. Part III.* – HIRLAM Technical Report. No 55.
- Sass, B.H., Nielsen N.W., Jorgensen, J.U., Amstrup B., 1999. *The operational DMI-HIRLAM system* - DMI Technical report.
- Savijärvi H., 1994. *Numerical Models of Atmosphere*. Lecture notes. Käsikirjaline arvutil toimetatud ja paljundatud loengukonspekt TÜ Keskkonnafüüsika Instituudis.

Stull, R.B., 1990. *An introduction to Boundary Layer Meteorology* – Kluwer Academic Publishers, Dordrecht/Boston/London.

Swimbank, R., Shutyaev, V., Lahoz, W.A., 2002. *Data Assimilation for the Earth System* – Kluwer Academic Publishers, Dordrecht/Boston/London

Tisler, P., 1990. *Atmosfääri maalähedase kihi ja aluspinna vastasmõju eksperimentaalne uurimine*. Diplomitöö, Tartu ülikool, 1990.

Tisler P., 1999. *HIRLAM and marine boundary layer winds* – 2-nd Nordic Marine Sciences Meeting Hirtskals 2-4 March 1999.

Tisler P., Fortelius C., *Verification of HIRLAM marine boundary layer winds* – Meri - report of series of the Finnish Institute of Marine Research.

Uden P., Cats G., 2000. *HIRLAM (The international HIRLAM project)*
[Http://www.knmi.nl/hirlam](http://www.knmi.nl/hirlam)

Uden, P., Rontu, L., jt., 2002. *HIRLAM-5 Scientific Documentation*

<http://apollo.aai.ee/ilmatark/>

<http://www.ecmwf.int/>

<http://www.knmi.nl/hirlam/>

Summary

This Master thesis has been made within the frames of learning and experimentation of the HIRLAM model at the Estonian Meteorological and Hydrological Institute (EMHI). The theoretical part of work was made using the literature, manuals, information from the Internet and other auxiliary materials of HIRLAM. Experiments were made using HIRLAM computing environment and cluster-computer at EMHI.

In the first chapters of Master thesis an overview of weather forecast models is given. Separately has been observed the NWP-model HIRLAM.

The main goal of the work was to assess the quality of wind parameters with different resolution hydrostatic and non-hydrostatic HIRLAM models in the Estonian coastal regions and islands. For this purpose a 10 days period beginning from the end of November until the beginning of December (27.11.1999 - 06.12.1999) was chosen. The weather of that period was modelled with two different model versions of HIRLAM which had different resolutions dynamics. First high resolution (11 x 11 km) hydrostatic (H11) and secondly very high resolution (3.3 x 3.3 km) non-hydrostatic model (MH3) was used.

Model versions wind data with observational data were compared. Six weather stations from Estonia (Kihnu, Kunda, Pärnu, Ristna, Sõrve, Vilsandi) and 1 weather tower from Finland (Kålbådagrund) were used. Observations were compared with forecasts of different length. In non-hydrostatic case analyses, 3-, 6-, 9- and 12-hours forecasts were used. The main problems which came up using MH3 were:

- because of limited computational environment too small spatial area was used;
- Courant-Friedrich-Lewy (CFL) condition of stability in the Euler explicit time integration scheme made the forecasts computations unstable and long;
- There was no good climate database for very high resolution;
- Restrictions from the scaling;

In hydrostatic case analyses, 3-, 6-, 9-, 12-, 15-, 18-, 21- and 24 hours forecasts were used.

In assessing of forecasts two different factors were computed: forecast reliability and accuracy. Also the models analyses and 6 hours forecasts were compared with observations in case of different wind directions. In this case also correlation coefficients and regression parameters were calculated.

Finally the high resolution hydrostatic and very high resolution non-hydrostatic model versions wind fields with each other from the model lowest level interpolated to the 10 m height level were compared.

The conclusions were:

- 1) Running non-hydrostatic very high resolution model different kind of problems were occurring (CFL, scaling, climate database, limited computational environment);
- 2) Using optimal interpolation assimilation scheme revealed the wind speed underestimation in the hydrostatic model analysis;

- 3) H11 wind speed forecasts had generally better reliability and accuracy than MH3 forecasts;
- 4) Better reliability in MH3 wind direction forecasts was found except Kihnu. MH3 gave also smaller bias results than H11. According to accuracy the differences were small between the model versions except Sõrve;
- 5) Both model had a tendency to overestimate weaker winds and underestimate stronger winds, except Kålbagrund where the observations were underestimated by both models;
- 6) Overestimated were stations which were more influenced from the different obstacles (Ristna, Pärnu). Underestimated were stations which were situated from the open sea (Kålbagrund). And generally correctly were estimated the stations which located on the open coast (Sõrve, Vilsandi, Kihnu, Kunda);
- 7) The only advantage of non-hydrostatic version occurred because of using higher resolution. The domain and time period was not very suitable for package of non-hydrostatic dynamics because the Estonian territory is too flat and in November and December the most weather processes are mainly advective, without meaningful convection.

LISAD

Lisa 1. Mudelversioonide prognooside tuulekiiruse süstemaatilise ja ruutkeskmise vea väärtused erinevate vaatlusjaamade puhul.

Kihnu	00fc	03fc	06fc	09fc	12fc	15fc	18fc	21fc	24fc
MH3	-0,81	-1,17	-0,80	-1,02	-0,86				
MH3	2,71	2,99	3,35	3,57	4,10				
H11	-2,44	-0,55	-0,09	-0,83	-0,23	-0,68	0,17	-0,82	0,06
H11	3,25	3,27	3,29	3,76	4,23	4,34	4,45	4,63	4,82

Kunda	00fc	03fc	06fc	09fc	12fc	15fc	18fc	21fc	24fc
MH3	1,95	1,29	1,33	1,20	1,44				
MH3	2,81	2,45	2,75	2,96	3,37				
H11	-1,41	0,12	-0,07	-0,20	-0,19	-0,24	-0,14	-0,18	-0,16
H11	2,50	2,10	2,31	2,46	2,69	2,81	2,98	3,06	3,05

Pärnu	00fc	03fc	06fc	09fc	12fc	15fc	18fc	21fc	24fc
MH3	0,95	2,03	2,33	2,19	2,34				
MH3	1,81	2,89	3,45	3,56	4,02				
H11	-0,61	1,29	1,43	1,14	1,31	1,22	1,57	1,23	1,50
H11	1,52	2,08	2,64	2,97	3,29	3,55	3,80	3,79	3,77

Ristna	00fc	03fc	06fc	09fc	12fc	15fc	18fc	21fc	24fc
MH3	2,39	0,99	1,27	1,06	1,29				
MH3	3,55	3,16	3,62	3,78	4,29				
H11	0,24	1,64	1,99	1,31	1,88	1,30	1,97	1,43	1,97
H11	2,23	3,00	3,77	4,02	4,27	4,43	4,58	4,60	4,61

Sõrve	00fc	03fc	06fc	09fc	12fc	15fc	18fc	21fc	24fc
MH3	-1,53	-1,77	-1,34	-1,68	-1,28				
MH3	2,28	3,13	3,36	4,34	4,55				
H11	-2,42	-0,48	-0,13	-0,74	-0,21	-0,47	-0,08	-0,33	-0,01
H11	3,07	2,75	3,12	4,12	4,28	4,93	4,82	5,62	5,33

Vilsandi	00fc	03fc	06fc	09fc	12fc	15fc	18fc	21fc	24fc
MH3	-0,48	-0,56	-0,23	-0,40	-0,23				
MH3	2,84	3,87	4,52	4,99	5,59				
H11	-1,67	0,38	0,46	-0,03	0,39	0,03	0,42	0,19	0,47
H11	3,60	3,32	4,17	4,71	5,28	5,58	5,70	5,88	5,89

Kålbadagrund	00fc	03fc	06fc	09fc	12fc	15fc	18fc	21fc	24fc
MH3	-1,21	-1,96	-1,91	-1,94	-1,78				
MH3	2,21	2,95	3,89	4,06	4,85				
H11	-3,21	-1,41	-1,29	-2,13	-1,62	-2,38	-1,67	-2,44	-1,74
H11	3,62	2,51	2,98	3,90	4,24	4,88	4,89	5,39	5,21

Lisa 2. Mudelversioonide prognooside tuulesuuna süstemaatilise ja ruutkeskmise vea väärtused erinevate vaatlusjaamade puhul.

Kihnu	00fc	03fc	06fc	09fc	12fc	15fc	18fc	21fc	24fc
MH3	-4,9	-5,1	-11,1	-5,2	-11,0				
MH3	22,3	44,1	53,8	62,2	68,7				
H11	-2,2	-3,4	-4,9	3,5	1,7	3,7	0,3	3,1	1,3
H11	22,4	38,9	55,4	63,0	70,6	74,0	77,4	78,3	79,3

Kunda	00fc	03fc	06fc	09fc	12fc	15fc	18fc	21fc	24fc
MH3	15,3	17,9	16,6	19,1	15,7				
MH3	81,4	58,4	63,4	72,8	72,1				
H11	17,2	18,9	17,0	22,1	15,9	22,6	17,5	24,5	17,9
H11	82,4	60,0	59,6	72,3	72,0	78,6	79,4	81,8	83,8

Pärnu	00fc	03fc	06fc	09fc	12fc	15fc	18fc	21fc	24fc
MH3	17,7	20,9	17,0	21,9	16,8				
MH3	25,0	43,8	53,7	62,2	69,3				
H11	22,4	22,2	21,4	27,9	21,8	28,9	24,2	22,7	25,1
H11	28,8	41,9	54,9	61,8	68,7	73,6	78,5	79,1	79,7

Ristna	00fc	03fc	06fc	09fc	12fc	15fc	18fc	21fc	24fc
MH3	-3,9	-11,8	-6,2	-10,9	-5,7				
MH3	58,1	65,5	80,3	87,5	96,1				
H11	-2,8	-2,0	-4,7	3,4	-4,7	4,6	-3,4	7,3	-2,1
H11	57,8	69,7	81,5	89,1	96,7	101,1	105,4	105,9	106,4

Sõrve	00fc	03fc	06fc	09fc	12fc	15fc	18fc	21fc	24fc
MH3	-3,5	-0,7	-5,7	-1,5	-5,0				
MH3	49,8	17,1	32,5	45,7	53,1				
H11	8,1	-1,0	6,4	12,7	8,1	9,7	10,0	9,5	10,9
H11	15,2	27,5	40,5	52,2	60,3	61,9	71,1	71,0	75,3

Vilsandi	00fc	03fc	06fc	09fc	12fc	15fc	18fc	21fc	24fc
MH3	0,4	0,9	-2,8	1,6	-1,9				
MH3	55,2	19,8	30,2	56,6	61,8				
H11	2,1	3,2	0,9	7,8	9,8	7,5	2,4	12,2	12,3
H11	55,8	19,1	31,7	56,1	72,5	76,3	82,6	85,0	91,6

Kålbadagrund	00fc	03fc	06fc	09fc	12fc	15fc	18fc	21fc	24fc
MH3	-1,4	0,4	-2,4	0,9	-3,1				
MH3	11,0	56,2	59,8	79,4	84,0				
H11	1,7	3,5	-0,6	5,5	-0,7	6,8	0,2	8,1	1,4
H11	9,2	56,9	59,6	80,4	81,1	92,3	95,5	100,1	104,7

Lisa 3. H11 ja MH3 analüüside ning 6-tunnise prognooside 10-päevased keskmistatud tuuleväljad mudeli alumisel tasemel.

