



Aki Korpela

**INDIMAN
ERUSTEET**

 **Tammertekniikka**

Aki Korpela

Tuulivoiman perusteet

1. painos (2016)

YHTEYSTIEDOT

Tilaukset ja tiedustelut

Amk-Kustannus Oy Tammertekniikka, Tampere

Puh. (050) 585 4930

Fax (03) 2530 306

Sähköposti tilaukset@tammertekniikka.fi

www.tammertekniikka.fi

Kirjan kansikuva: Lauri Hietalahti

Kustantaja: Amk-Kustannus Oy, Tammertekniikka

1. painos, 2016

ISBN 978-952-5491-84-5

Hansaprint Oy

Direct Vantaa, 2016

Symbolit

A	pinta-ala
A_0	kontrollitilavuuden poikkipinta-ala Betzin lain yhteydessä
A_1	kontrollitilavuuden poikkipinta-ala Betzin lain yhteydessä
A_{roottori}	lavoista ja navasta koostuvan roottorin pyyhkäisy-pinta-ala
a	kiihtyvyys
$a_{1\text{tan}}$	hiukkasen tangentiaalinen kiihtyvyys
B	magneettivuontiheys
C	weibull-jakauman määräkerroin
E	sähkökentän voimakkuus
F	voima
F_{1z}	hiukkaseen kohdistuvan voiman z -suuntainen komponentti
$F_{1\text{rad}}$	hiukkaseen kohdistuvan voiman säteittäinen komponentti
$F_{1\text{tan}}$	hiukkaseen kohdistuvan voiman tangentiaalinen komponentti
F_a	esimerkkivoima vääntömomentin määrittelyn yhteydessä
F_b	esimerkkivoima vääntömomentin määrittelyn yhteydessä
F_c	esimerkkivoima vääntömomentin määrittelyn yhteydessä
F_c	coriolis-voima
F_g	gravitaatiovoima
F_k	kitkavoima
F_{kh}	keskihakuvoima
F_{pg}	painegradienttivoima
$F_{\text{pg},x}$	painegradienttivoiman x -suuntainen komponentti
$F_{\text{pg},y}$	painegradienttivoiman y -suuntainen komponentti
$F_{\text{pg},z}$	painegradienttivoiman z -suuntainen komponentti
F_{tan}	tangentiaalinen voima
F_{turbiini}	turbiiniin kohdistuva voima
f	esiitymistodennäköisyys Weibull-jakauman yhteydessä
f_r	roottorin taajuus
f_s	staattorin taajuus
f_{sv}	sähköverkon taajuus
f_u	ohjausjännitteen taajuus
I	hitausmomentti
I_1	hiukkasen hitausmomentti
k	weibull-jakauman muotokerroin
l_a	voiman F_a etäisyys kiertoliikkeen akselista
l_b	voiman F_b etäisyys kiertoliikkeen akselista
m	massa
m_1	hiukkasen massa vääntömomentin määrittelyn yhteydessä
i	ilmavirtauksen massavirta
n	generaattorin napaparien lukumäärä
n_n	roottorin pyörimisnopeus tahtinopeudella
n_r	roottorin pyörimisnopeus
P	teho

P_0	ilmavirtauksen teho
P_{gen}	generaattorin teho
P_i^i	esiintymistodennäköisyyttä f_i vastaava tuulen tehotiheys
P_{ka}^i	tuulen keskimääräinen tehotiheys
p	ilmanpaine
p_0	kontrollitilavuuden ilmanpaine Betzin lain yhteydessä
p_{avg}	keskimääräinen ilmanpaine merenpinnan tasolla
R	lavan pisteen kohtisuora etäisyys turbiinin keskipisteestä
r_1	hiukkasen etäisyys kiertoliikkeen akselista
s	etäisyys
s_f	jättämä
V	jännite
V_{oc}	tyhjäkäyntijännite
v	nopeus
v_0	ilmavirtauksen nopeus
v_1	ilmavirtauksen nopeus Betzin lain yhteydessä
v_{iv}	ilmavirtauksen nopeus Betzin lain yhteydessä
v_{ka}	tuulennopeuden keskiarvo
$v_{kehä}$	lavan kärjen kehänopeus
v_{max}	tuulen maksiminopeus
W	työ
W_0	ilmavirtauksen liike-energia
W_a	vuoden aikana tuotettu energia
$x_{roottori}$	vaakasuuntainen koordinaatti tuulivoimalan roottorin kohdalla
α_z	kulmakiihtyvyys, kun z-akseli on kiertoliikkeen akseli
Φ_B	magneettivuo
Γ	yleinen gamma-funktio
λ	kärjen nopeussuhde
θ	pyörähdyskulma
ρ	tiheys
τ_z	kiertoliikkeen akselista etäisyydellä r_1 vaikuttavan voiman vääntömomentti
τ_a	kiertoliikkeen akselista etäisyydellä l_a vaikuttavan voiman vääntömomentti
τ_z	lavan pisteen vääntömomentti roottorin akselin suhteen
ω_1	roottorin kulmanopeus
ω_z	kulmanopeus, kun z-akseli on kiertoliikkeen akseli

TUULIVOIMAN PERUSTEET

Sisällysluettelo

Symbolit		(i)
1	Johdanto	5
2	Tuuli luonnonilmiönä	7
2.1	Ilmanpaine	7
2.1.1	Ilmanpaineen pystysuuntaiset muutokset	8
2.1.2	Ilmanpaineen vaakasuuntaiset muutokset	8
2.1.3	Matala- ja korkeapaineet	12
2.2	Ilmavirtojen liikkeisiin vaikuttavat voimat	13
2.2.1	Painegradienttivoima	13
2.2.2	Keskihakuvoima	15
2.2.3	Coriolis-voima	16
2.2.4	Kitka	20
2.2.5	Gravitaatio	22
2.3	Voimien yhteisvaikutuksista syntyvät ilmavirtaustyypit	23
2.3.1	Hydrostaattinen tasapaino	23
2.3.2	Geostrofinen tuuli	24
2.3.3	Gradienttituuli	25
2.3.4	Tuuli rajakerroksessa	26
2.3.5	Terminen tuuli	28
2.3.6	Yhteenvedo ilmavirtaustyypeistä	29
2.4	Globaalit ilmavirtaukset	30
2.4.1	Yksinkertaistettu malli maapallosta	31
2.4.2	Osittain pysyvät painealueet	32
3	Tuulen teho	36
3.1	Ilmavirtauksen energia ja teho	36
3.2	Betzin laki	37
3.3	Tuulen mittaaminen	43
3.4	Tuulisuuden mallintaminen	45
4	Lapasuunnittelun perusteet	49
4.1	Tuulivoimalan rakenne	49
4.2	Kiertoliikkeen dynamiikka	51
4.2.1	Vääntömomentti	52
4.2.2	Jäykän kappaleen kulmakiihtyvyys ja hitausmomentti	52
4.2.3	Kiertoliikkeen energia ja teho	55
4.3	Nostovoima ja vastusvoima	56
4.4	Suhteellinen tuuli	57

4.4.1	Kohtauskulma ja sakkaaminen	59
4.4.2	Perustelu lavan kierteelle	61
4.4.3	Kärjen nopeussuhde	62
4.5	Pintasuhde	65
4.6	Turbiinin tehosäätö	67
5	Tuulivoimaloiden generaattorit	70
5.1	Sähkömagneettinen induktio ja vaihtosähkögeneraattorin toimintaperiaate	71
5.1.1	Tahtigeneraattori	72
5.1.2	Epätahtigeneraattori	75
5.2	Eri generaattorityypit tuulivoimakäytössä	76
5.2.1	Vakionopeuksinen tuulivoimala	77
5.2.2	Rajoitetusti muuttuvanopeuksinen tuulivoimala	79
5.2.3	Muuttuvanopeuksinen tuulivoimala osatehoisella suuntaajakäytöllä (DFIG)	80
5.2.4	Muuttuvanopeuksinen tuulivoimala täystehoisella suuntaajakäytöllä	80
5.2.5	Yhteenveto generaattorityyppien toimintaperiaatteista	81
6	Tuulivoimalan energiantuotanto-odotukset	86
6.1	Hyötysuhde, huipunkäyttöaika ja kapasiteettikerroin	86
6.2	Pinta-alamenetelmä	87
6.3	Tehokäyrämenetelmä	88
6.4	Suomen tuulivoimatuotanto	91
6.4.1	Voimaloiden yleisimmät viat	95

1 JOHDANTO

Tämän kirjan pääasiallinen tarkoitus on tarjota lukijalle kattava perusasioiden ymmärrys tuulivoimasta. Kyseessä on monipuolinen ja poikkeusteellinen ala, jonka vahva osaaminen edellyttää ainakin sähkötekniikan, mekaniikan, virtausopin ja meteorologian hallintaa. Oikotietä onneen ei kuitenkaan ole olemassa, ja siksi tässä teoksessa pääpaino onkin perusasioiden selkokielisellä käsittelyllä. Mikään kirjoitettu teksti ei tietenkään pysty suoraan tarjoamaan ymmärrystä, joka on lopulta mahdollista saavuttaa vain lukijan oman ajatustyön seurauksena. Kirja on kuitenkin pyritty kirjoittamaan niin, että se helpottaa ajatustyön tekemistä ja saa toivottavasti lukijansa kiinnostumaan aiheesta entistä enemmän. Tyyli asioiden esittämiseen on matkittu amerikkalaiselta fyysikolta ja nobelistilta Richard Feynmanilta, joka on maineikkaassa kirjasarjassaan *Feynman Lectures on Physics* vahvasti panostanut ilmiöiden selkokieliseen esittämiseen. Kun tähän yhdistetään lukijan pitkäjänteinen ja periksi antamaton ajatustyö, syvällisempi ymmärrys luonnon toiminnasta on mahdollista saavuttaa.

Kirjan toinen luku käsittelee tuulta luonnonilmiönä. Ensin käydään yksitellen läpi ilmavirtauksiin vaikuttavat voimat, ja sen jälkeen luokitellaan voimien yhteisvaikutuksista syntyvät virtaustyypit. Tämän jälkeen pyritään vielä antamaan yleiskuva globaaleista ilmavirtauksista maapallolla. Luvussa kolme keskitytään tuulen tehoon. Ensin mietitään, mitä tuulen teho tarkoittaa, ja sen jälkeen johdetaan Betzin laiksi kutsuttu yläraja tuulivoimalan aerodynaamiselle hyötysuhteelle. Lisäksi käsitellään tuulisuuden mittaamista ja mallintamista, jotka ovat oleellisia tekijöitä tuulivoimahanketta suunniteltaessa. Neljäs luku keskittyy tuulivoimalan roottorin toimintaan. Luvun oleellinen tavoite on antaa lukijalle ymmärrys roottorin perusfysiikasta. Miten roottorin teho on lausuttavissa kiertoliikkeen dynamiikan termein, ja mitä asioita lapasuunnittelussa on otettava huomioon? Luvussa viisi tarkastellaan, millaisilla generaattoriratkaisuilla roottorin mekaaninen energia muunnetaan tuulivoimaloissa sähköenergiaksi. Tavoitteena on generaattorien toimintaperiaatteiden avulla perustella tarve erityyppisille generaattoreille erityyppisissä tuulivoimaloissa. Luvussa kuusi tarkastellaan tuulivoimaloiden energiantuotanto-odotuksia. Kaksi vaihtoehtoista menetelmää energiantuotannon laskentaan käydään läpi, ja lisäksi tarkastellaan Suomeen asennettujen suuren kokoluokan tuulivoimaloiden toteutuneita energiantuotantolukemia 2000-luvulla.

Tehdään vielä johdannon päätteeksi alan terminologiaan liittyvä tarkennus. *Turbiinilla* tarkoitetaan sähköenergiaa tuottavissa voimalaitoksissa yleisesti sitä laitetta, joka mekaanisen energiansa turvin pyörittää generaattoria. Tämän vuoksi olisi loogista, että myös tuulivoimalassa turbiinilla tarkoitettaisiin lavoista ja navasta koostuvaa kokonaisuutta, joka pyörittää generaattoria. Tuulivoima-alalle on kuitenkin vakiintunut oma termistönsä,

jossa *turbiini* on synonyymi koko *tuulivoimalalle*, ja lavoista sekä navasta koostuvaa kokonaisuutta kutsutaan *roottoriksi*. Tämä on siinä mielessä hieman ongelmallista, että tuulivoimalassa roottori tarkoittaa täten kahta eri asiaa, sillä kyseisellä termillä kutsutaan myös generaattorin pyörivää osaa. Käytännössä tästä ei silti yleensä synny ongelmia, sillä useimmiten asiayhteydestä kyllä selviää, mitä kulloinkin tarkoitetaan. Lukijan tulee kuitenkin pitää mielessä, ettei tuulivoimatermistö ole täysin yksikäsitteinen, ja siksi myös alan kirjallisuuden lukeminen vaatii tarkkuutta.

Suuri osa tämän kirjan tekstistä on allekirjoittaneen omaa tajunnanvirtaa, joka on vuosien varrella jalostunut aiemmin luettuja asioita miettien. Seuraavassa on kuitenkin lista muutamasta merkittävästä lähteestä, jotka ovat olleet erityisen hyödyllisiä tätä teosta kirjoitettaessa. Teksteissä näihin lähteisiin viitataan oheisen taulukon järjestysnumeroilla.

- [1] T. Ackermann, *Wind Power in Power Systems*, John Wiley & Sons, 2005.
- [2] A. Ahlström, *Aeroelastic Simulation of Wind Turbine Dynamics*, Doctoral Thesis from Royal Institute of Technology, 2005.
- [3] P. Gipe, *Wind Power: Renewable Energy for Home, Farm and Business*, Chelsea Green Publishing Company, 2004.
- [4] E. Hau, *Wind Turbines: Fundamentals, Technologies, Application, Economics*, Springer, 2006.
- [5] J. Moran, M. Morgan, *Meteorology: The Atmosphere and the Science of Weather*, Prentice-Hall, 1997.
- [6] V. Turkia, H. Holttinen, *Tuulivoiman tuotantotilastot 2011*, VTT Technology 74, 2013.

Valkeakoskella 2.9.2015,



Aki Korpela

2 TUULI LUONNON ILMIÖNÄ

Tässä luvussa, jonka sisältö perustuu lähteeseen [4], käsitellään tuulta luonnonilmiönä. Tavoitteena on antaa lukijalle käsitys siitä, mitkä voimat ilmamolekyyleihin vaikuttavat, ja miten nämä voimat synnyttävät erilaisia ilmavirtaustyyppejä. Lisäksi luvussa pyritään antamaan käsitys globaaleista ilmavirtauksista, jotka ovat vuodesta toiseen pysyviä.

Ilmakehän kaasuseos, ilma, koostuu pääosin tpeestä (78% tilavuudesta), hapestä (21%), argonista (0.9%) ja hiilidioksidista (0.03%). Lisäksi ilma sisältää pieniä määriä neonia, heliumia, metaania, kryptonaa, vetyä ja otsonia. Kun puhutaan ilmamolekyyleistä, tarkoitetaan ilmakehässä luonnostaan esiintyvien kaasujen muodostamia molekyylejä. Ilmamolekyylejä ovat siis esimerkiksi typpi- ja happimolekyylit, mutta lisäksi myös vesimolekyylit luetaan ilmamolekyyleihin, sillä käytännössä ilma sisältää aina jonkin verran kosteutta.

Tuuli on ilmamolekyylin liikettä suhteessa maapallon pyörimisliikkeeseen. Täysin tyynessä säässä ilmamolekyylin ja maapallon pyörimisliikkeen nopeusvektorit ovat yhtä suuret, jolloin maanpäällisen tarkkailijan silmin ilma ei liiku. Toisin sanoen tuulta esiintyy maanpäällisen tarkkailijan silmin aina silloin, kun ilmamolekyylin nopeus poikkeaa maapallon pyörimisliikkeen nopeudesta.

2.1 ILMANPAINEN

Ilma kohdistaa voiman kaikkiin kappaleisiin, joiden kanssa se on kontaktissa. Vaikka makroskooppisesti tarkasteltuna ilma pysyisikin paikallaan, mikroskooppinen tarkastelu osoittaa ilmamolekyylin olevan jatkuvassa satunnaisessa liikkeessä. Kun ilma pääsee kontaktiin kappaleen kanssa, ilmamolekyylit törmäilevät kappaleen pintaan kohdistuen siihen voiman. Ilmanpaine määritellään kyseisenä voimana pinta-alayksikköä kohti.

Ilmanpaineeseen vaikuttavia tekijöitä ovat ilmamolekyylin massa, gravitaatiokiikkyvyys ja lämpötila, joka liittyy läheisesti ilmamolekyylin satunnaisen liikkeen aktiivisuuteen. Tietyn kohteen ilmanpainetta määritettäessä mitataan yleensä ilman paino pinta-alayksikköä kohti. Keskimääräinen ilmanpaine merenpinnan tasolla vastaa noin yhden kilogramman massaa (tarkemmin 1.0328746 kg) neliösenttimetriä kohden. Paineen SI-yksikkö on pascal (N/m^2), mutta ilmanpaineen yhteydessä yleisemmin käytetty yksikkö on bar. Täten keskimääräinen ilmanpaine p_{avg} merenpinnan tasolla on

$$p_{\text{avg}} = \frac{1.0328746 \text{ kg} \cdot 9.81 \text{ m/s}^2}{10^{-4} \text{ m}^2} = 101325 \text{ Pa}.$$

Pascalin ja barin välinen riippuvuus on $1 \text{ Pa} = 0.01 \text{ mbar}$, joten keskimääräinen ilmanpaine merenpinnan tasolla on $1013.25 \text{ mbar} = 1.01325 \text{ bar}$.

Tarkastellaan ilmanpaineen käsitettä vielä yhden esimerkin avulla. Jos merenpinnan tasolla olevan tasakattoisen omakotitalon kattopinta-ala on 100 m^2 eli 10^6 cm^2 , katon yläpuolella oleva ilma kohdistaa edellä käsitellyn keskimääräisen ilmanpaineen perusteella kattoon noin miljoonan kilogramman massaa vastaavan voiman. Kysymys kuuluu, miksi talon katto pysyy ehjänä. Se tuskin pysyisi ehjänä, jos katolle kasattaisiin miljoona kilogrammaa kiviä, mutta miksi katto kestää miljoonan kilogramman ilman painon? Vastaus on siinä, että kun ilmanpaine on vakio, se kohdistaa kai-kissa pisteissä saman voiman kaikkiin suuntiin pinta-alayksikköä kohti. Katto kestää miljoonan kilon massan, sillä vastaava voima työntää kattoa ylöspäin talon sisäpuolelta, jos talon sisällä on sama ilmanpaine kuin ulkona. Toisin sanoen kattoon kohdistuva nettovoima on nolla. Tämä painetasapaino on vallitseva olosuhde ilmakehässä.

2.1.1 Ilmanpaineen pystysuuntaiset muutokset

Ilma on voimakkaasti puristuva kaasu. Kun esimerkiksi polkupyörän renkaaseen pumpataan ilmaa, ilmamolekyylien määrä renkaan sisällä kasvaa tilavuuden merkittävästi muuttumatta. Tällöin ilman tiheys, eli massa tilavuusyksikköä kohti, kasvaa. Gravitaation seurauksena ilmakehän korkeimmat ilmanpainelukemat löytyvät merenpinnan tasolta, sillä maan veto-voima puristaa ilmaa sitä enemmän, mitä enemmän tarkastelukohdan yläpuolella on ilmamassaa. Ja mitä korkeampi on ilmanpaine, sitä suurempi on ilman tiheys, eli sitä pienempi on kahden ilmamolekyylien välinen keskimääräinen etäisyys. Ilman tiheys siis pienenee, kun korkeus merenpinnasta kasvaa. Kun yleisesti puhutaan *ohuesta vuoristo-ilmasta*, tarkoitetaan juuri alhaista ilman tiheyttä merenpinnan tasoon verrattuna. Ilman tiheys pienenee varsin nopeasti korkeuden kasvaessa, sillä 16 km:n korkeudella ilman tiheys on enää noin 10% keskimääräisestä merenpinnan arvosta.

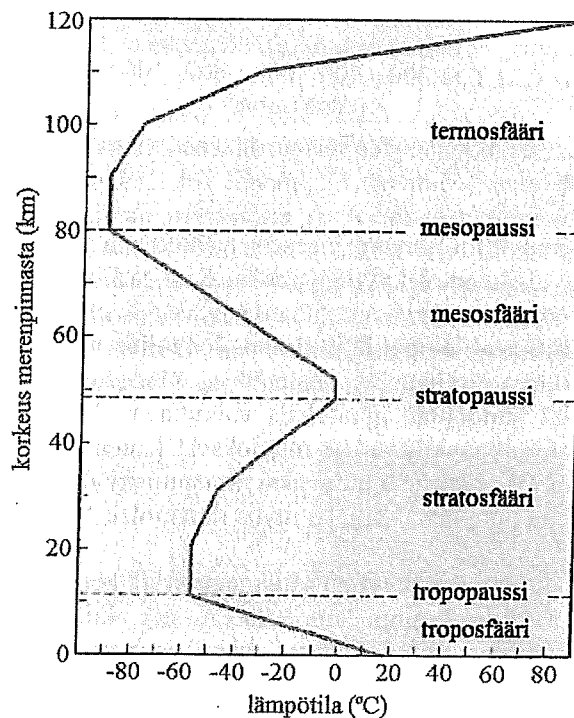
Pystysuuntainen ilmanpaineen profiili esitetään yleensä standardin ilmakehän avulla, joka on malli todellisesta ilmakehästä. Standardi ilmakehä perustuu ilmakehän olosuhteiden keskiarvoistamiseen kaikilla leveyspiireillä kaikkina vuodenaikoina. Standardissa ilmakehässä merenpinnan tason lämpötilaksi on kiinnitetty $15 \text{ }^\circ\text{C}$ ja ilmanpaineeksi edellä mainittu 1013.25 mbar . Lisäksi lämpötilan ja paineen oletetaan muuttuvan korkeuden funktiona kuvien 2.1 ja 2.2 mukaisesti.

2.1.2 Ilmanpaineen vaakasuuntaiset muutokset

Ilmanpaine vaihtelee yleisesti, vaikkei korkeus merenpinnasta muuttuisikaan. Itse asiassa meteorologit ovat yleensä kiinnostuneita nimenomaan

ilmanpaineen vaakasuuntaisista muutoksista, sillä ne vaikuttavat merkittävästi vallitsevaan säätilaan. Sääkartoilla esitetyt ilmanpainelukemat ovatkin aina merenpinnan tasoa vastaavia ilmanpaineita. Jos säähavaintoaseman korkeus poikkeaa merenpinnan tasosta, mitattu ilmanpaine muutetaan merenpinnan tasoa vastaavaksi standardiin ilmakehään perustuvien mallien avulla.

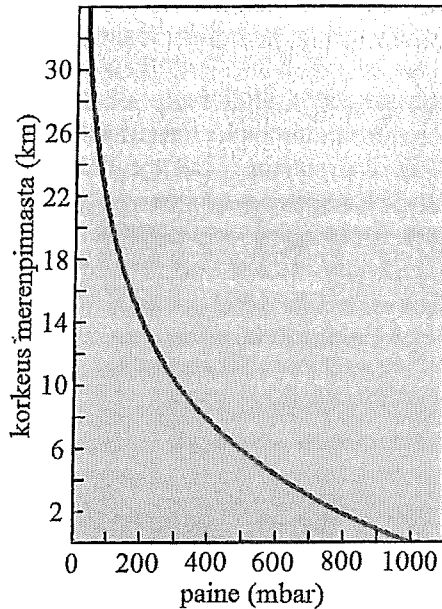
Vaakasuuntaiset ilmanpaineen muutokset ovat absoluuttisilta arvoiltaan huomattavasti pienempiä kuin pystysuuntaiset muutokset. Kuten kuvasta 2.2 nähdään, pystysuuntainen ilmanpaine muuttuu jo useita satoja millibareja, kun korkeus merenpinnasta kasvaa muutamaan kilometriin. Vaakasuuntainen ilmanpaineen muutos on yleensä korkeintaan luokkaa 100 mbar, olipa kohteiden välinen etäisyys kuinka suuri tahansa. Kaikkien aikojen alhaisin merenpinnan tason ilmanpaine, 870 mbar, mitattiin taifuunin yhteydessä Tyynellä valtamerellä vuonna 1979. Voimakkaimmissa tornadoissa ilmanpaine laskee todennäköisesti vieläkin alemmas, mutta toistaiseksi ainoakaan mittalaite ei ole sen mittaamisesta selvinnyt.



Kuva 2.1. Ilman lämpötilan ja korkeuden välinen riippuvuus standardin ilmakehän mallissa.

myrskyn silmästä ehjänä ulos. Kaikkien aikojen korkein merenpinnan tason ilmanpainelukema, 1083.8 mbar, mitattiin äärimmäisen kylmästä ilmasta Siperiassa vuonna 1968. Vaikka näiden ääripäiden välinen erotus onkin yli 200 mbar, normaaleissa sääolosuhteissa vaakasuuntainen ilmanpaineen muu-

tos ei yleensä ylitä sataa millibaria. Siitä huolimatta sillä on ratkaiseva merkitys vallitsevaan säätilaan.



Kuva 2.2. Ilmanpaineen ja korkeuden välinen riippuvuus standardin ilmakehän mallissa.

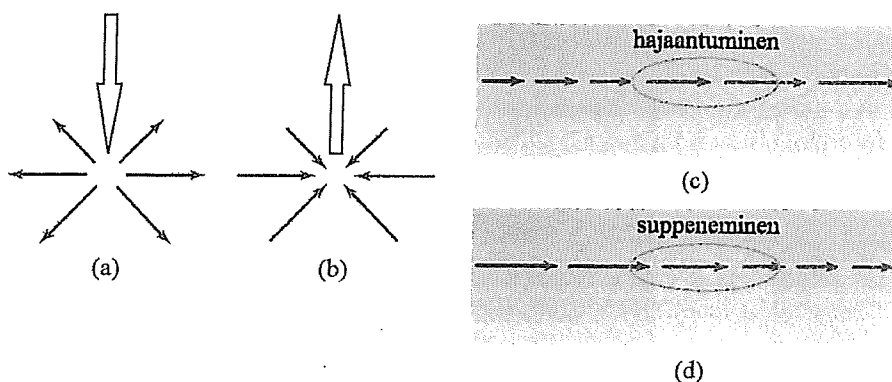
Kuten edellä jo mainittiin, ilmanpaineeseen vaikuttavia tekijöitä ovat gravitaatio, lämpötila ja ilmamolekyylien massa. Kun tarkastellaan vaakasuuntaisia ilmanpaineen muutoksia, gravitaation vaikutus ei muutu. Sen sijaan muuttuvia tekijöitä ovat lämpötila ja ilmamolekyylien massa, joista jälkimmäinen liittyy ilman sisältämään kosteuteen. Yleissääntönä voidaan kuitenkin sanoa, että lämpötilan muutokset vaikuttavat ilmanpaineeseen voimakkaammin kuin ilmankosteuden muutokset. Kuten luvun alussa mainittiin, vesimolekyyli luetaan kuuluvaksi ilmamolekyyliin, joten ilmankosteuden vaihtelut muuttavat samalla myös ilmamolekyylien massaa.

Ilman lämpötila on ilmamolekyylien satunnaiseen liikkeeseen liittyvän liikeenergian mitta. Mitä korkeampi lämpötila on, sitä aktiivisempaa on ilmamolekyylien satunnainen liike. Jos suljetussa astiassa olevaa ilmaa lämmitetään, ilmanpaine kasvaa, sillä ilmamolekyylit kohdistavat kasvaneen liike-energiansa seurauksena astian seinämiin aiempaa suuremman voiman. Oleellista on kuitenkin huomata, ettei ilman tiheys muutu, jos suljetun astian tilavuus säilyy muuttumattomana. Suljettuun astiaan ei tuotu yhtään ilmamolekyyliä lisää, joten massa tilavuusyksikköä kohti säilyy lämpötilan muutoksesta huolimatta muuttumattomana. Ilmakehää ei kuitenkaan voida ajatella suljettuna astiana, joten tilanne poikkeaa edellä kuvatusista siten, että ilmakehässä lämpötilan muutokset aiheuttavat myös ilman tiheyden muutoksia.

Ilmakehässä lämpötilan nousu pienentää ilmanpainetta. Lämpötilan nousu lisää ilmamolekyylien liikkeen aktiivisuutta, ja koska ilma pääsee laajenemaan, ilmamolekyylien välinen keskimääräinen etäisyys kasvaa. Toisin sanoen ilman tiheys pienenee. Ja kun ilman tiheys pienenee, samalla pienenee myös gravitaation aiheuttama paino, josta ilmanpaine on seuraus. Toisin sanoen kylmä ilma on tiheämpää kuin lämmin ilma, eli kylmässä ilmassa ilmanpaine on lähtökohtaisesti suurempi kuin lämpimässä ilmassa.

Ilmankosteuden kasvaminen pienentää ilmanpainetta. Tämä fakta on ristiriidassa yleisen uskomuksen kanssa, jonka mukaan *kosteaa ilmaa on raskaampaa kuin kuiva ilma*. Jos lämpötila pysyy muuttumattomana, kuiva ilma on todellisuudessa kosteaa ilmaa tiheämpää, sillä vesimolekyylin molekyylimassa on pienempi kuin työllä tai hapella. Kun ilmaan tulee vesimolekyyli, se ottaa yleensä paikan joko typpi- tai happimolekyyliltä, minkä seurauksena ilman tiheys pienenee. Tämän vuoksi kuivan ilmamassan ilmanpaine on suurempi kuin kostealla ilmamassalla, jos lämpötila pysyy muuttumattomana.

Lämpötilan ja ilmankosteuden muutosten lisäksi myös ilmavirtausten hajaantuminen ja suppeneminen aiheuttavat merkittäviä muutoksia ilmanpaineeseen. Yleisesti ottaen ei kuitenkaan voida sanoa, mihin suuntaan ilmavirtauksen hajaantuminen (kuva 2.3 (a)) ja suppeneminen (kuva 2.3 (b)) ilmanpainetta muuttavat. Jos kuvan 2.3 (a) mukaisessa tilanteessa pystysuorasti laskevan ilman massavirta (kg/s) on suurempi kuin säteittäisesti hajaantuvan virtauksen yhteenlaskettu massavirta, ilman tiheys ja samalla ilmanpaine kohteessa kasvavat. Mutta jos pystysuora massavirta onkin pienempi kuin säteittäisten massavirtojen summa, kohteen tiheys ja ilmanpaine pienenevät. Ja toki on mahdollista sekin, ettei ilmavirtauksen hajaantuminen aiheuta lainkaan ilmanpaineen muutosta.



Kuva 2.3. Ilmavirtauksen hajaantuminen ((a) ja (c)) ja suppeneminen ((b) ja (d)).

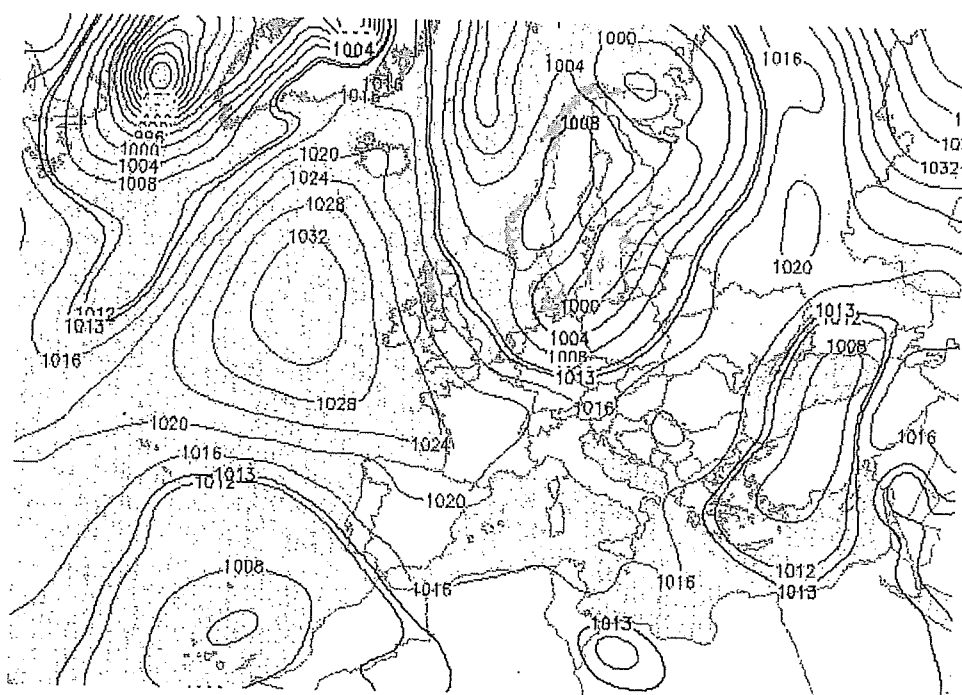
Vastaavasti kuvan 2.3 (b) mukaisessa tilanteessa ilmanpaine kasvaa, jos pystysuuntaan nousevan ilman massavirta on pienempi kuin säteittäisesti

suppenevan virtauksen yhteenlaskettu massavirta. Ilmavirtauksen hajaantumiseen tai suppenemiseen ei kuitenkaan tarvitse välttämättä liittyä kuvien 2.3 (a) ja (b) mukaista virtauksen suunnan muutosta. Tällöin hajaantumisen ja suppenemisen periaatteet noudattavat kuvia 2.3 (c) ja (d), joissa nuolen pituus kuvaa virtauksen nopeusvektorin pituutta. Kuvan (c) hajaantumiseen liittyy yleensä ilmanpaineen paikallinen pieneneminen katkoviiivalla merkitys ympyrän sisällä, sillä kohteesta poistuva massavirta on suurempi kuin kohteeseen tuleva. Vastaavalla logiikalla kuvan (d) mukaiseen suppenemiseen liittyy yleensä ilmanpaineen kasvu.

2.1.3 Matala- ja korkeapaineet

Sääennusteiden ilmanpainekartat esittävät merenpinnan tason ilmanpainelukemia tasa-arvokäyrien, eli isobarien, avulla. Koska ilmanpaine pysyy vakiona tasa-arvokäyrää pitkin kuljettaessa, syntyy kuvan 2.4 mukaisia ilmanpainekarttoja, joista voidaan helposti havaita matala- ja korkeapaineiden keskukset. Matalapaineen keskus tarkoittaa aluetta, jonka ilmanpaine on ympäristöään alhaisempi. Vastaavasti korkeapaineen keskuksessa

ilmanpaine on korkeampi kuin ympäröivässä alueessa. Kuvan 2.4 vahvin korkeapaineen keskus löytyy Atlantilta (1032 mbar), tosin Siperassa on samaan aikaan ollut tätäkin voimakkaampi korkeapaine, vaikkei absoluuttisia lukemia kuvasta näykään. Alhaisin matalapaineen keskus on 25.1.2011 sijainnut Grönlannin länsipuolella. Vaikka kyseisessä matala-paineessa tasa-arvokäyrät ovatkin niin lähellä toisiaan, että absoluuttiset ilmanpainelukemat jäävät piiloon, paineen voidaan kuitenkin havaita laskevan 970 mbarin alapuolelle. Tällainen tasa-arvokäyrien lähekkäisyys viittaa aina voimakkaaseen painegradienttiin, mistä seuraa voimakkaita tuulia. Seuraavaksi siirrytäänkin käsittelemään painegradientin käsitettä.



Kuva 2.4. Merenpinnan ilmanpaineen tasa-arvokäyrät 25.1.2011.
(weatheronline.co.uk)

2.2 ILMAVIRTAUKSIIN VAIKUTTAVAT VOIMAT

Ilmamolekyylit ovat massallisia hiukkasia, jotka liikkuvat varsin maltillisella nopeudella. Ilman liikettä tarkasteltaessa ei kuitenkaan ole tarvetta tarkastella yksittäistä molekyylillä, vaan yksinkertaisuuden vuoksi voidaan käsitellä suuresta määrästä ilmamolekyylejä koostuvaa tilavuutta, josta jatkossa käytetään nimitystä *ilmasolu*. Yksittäisen ilmasolun sisällä oletetaan olevan niin paljon ilmamolekyylejä, että ilman tiheyden käsitteestä tulee käyttökelpoinen. Kun ilman liikettä tarkastellaan tällaisten ilmasolujen liikkeenä, mallinnus voidaan tehdä klassisen fysiikan keinoin Newtonin lakien avulla. Tällöin suuriin nopeuksiin liittyvää suhteellisuusteoriaa tai atomikokoluokan mittasuhteisiin liittyvää kvanttimekaniikkaa ei tarvita.

Ilman liikkeeseen vaikuttavia voimia luokitellaan viisi kappaletta: paine-gradienttivoima, coriolis-voima, keskihakuvoima, kitka ja gravitaatio. Seuraavassa näitä voimia käsitellään yksi kerrallaan. Myöhemmin, luvussa 2.3, tarkastellaan voimien yhteisvaikutuksista syntyviä ilmavirtaustyypppejä.

2.2.1 Painegradienttivoima

Painegradientti on olemassa, jos paine muuttuu paikan suhteen. Ja kuten luvussa 2.1 käytiin läpi, ilmanpaine muuttuu paikan suhteen sekä pysty- että

vaakasuunnassa. Painegradienttivoimassa on ilmiötasolla kyse siitä, että tiheyserot pyrkivät luonnossa aina tasoittumaan korkeammasta tiheydestä kohti pienempää tiheyttä. Tiheyserojen tasaantumiseen liittyvästä liikkeestä käytetään yleensä nimitystä *diffuusio*. Sitä tapahtuu nesteissä ja kaasuissa, mutta jos mennään atomitasolle, diffuusiota voi tapahtua myös kiinteissä aineissa. Esimerkiksi puolijohteissa elektronien liike saattaa johtua varaustiheyden paikallisista eroavaisuuksista, jolloin puhutaan elektronien diffuusiosta.

Painegradienttivoiman F_{pg} komponentit määritellään yhtälöillä

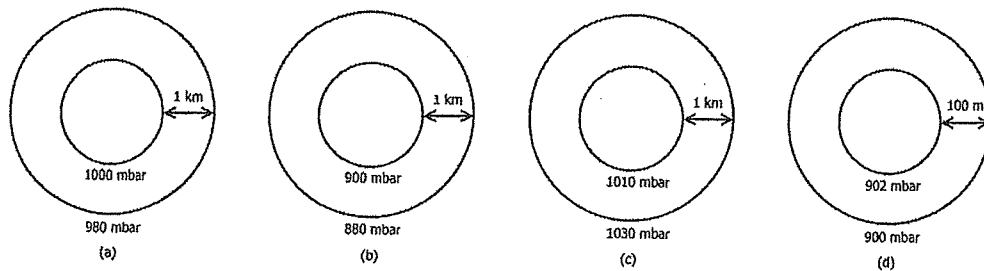
$$\frac{F_{pg,x}}{m} = -\frac{1}{\rho} \frac{dp}{dx}, \quad (2.1)$$

$$\frac{F_{pg,y}}{m} = -\frac{1}{\rho} \frac{dp}{dy}, \quad (2.2)$$

$$\frac{F_{pg,z}}{m} = -\frac{1}{\rho} \frac{dp}{dz}, \quad (2.3)$$

joissa ρ on ilmasolun tiheys, p on ilmanpaine, m on ilmasolun massa ja (x, y, z) ovat karteesisen koordinaatiston koordinaatit. Kyseessä on yksinkertaisesti Newtonin II peruslain ($F = ma$) mukaiset yhtälöt, joiden oikeat puolet edustavat ilmasolun kiihtyvyyksiä x -, y - ja z -suuntaan. Yhtälöistä huomataan myös se, että mitä suurempi on ilman tiheys, sitä pienemmäksi jää kiihtyvyyden itseisarvo. Toisin sanoen tietyn suuruinen painegradientti aiheuttaa tiheään ilmaan pienemmän kiihtyvyyden kuin harvaan ilmaan. Yhtälöissä esiintyvä miinusmerkki johtuu siitä, että kiihtyvyyden suunta on aina negatiivisen painegradientin suuntaan, eli korkeammasta paineesta kohti matalampaa painetta. Suureet dp/dx , dp/dy ja dp/dz ovat siis negatiivisia, jolloin ilmasolun kiihtyvyydestä tulee positiivinen.

Kuten luvun 2.1.3 lopussa mainittiin, sääkartan lähekkäiset isobarit tarkoittavat suurta painegradienttia ja samalla voimakkaita tuulia. Mitä lähempänä sääkartan isobarit ovat toisiaan, sitä lyhyemmällä etäisyydellä paine muuttuu, ja sitä suurempi on painegradientti. Oleellista on huomata, että ilmanpaineen absoluuttinen arvo ei vaikuta painegradienttiin, vaan ainoastaan paineen muutoksella ja kohteiden välisellä etäisyydellä on merkitystä. Tilannetta havainnollistaa kuva 2.5, jossa painegradientin arvo säilyy



Kuva 2.5. Tilanteet (a), (b) ja (d) esittävät korkeapaineen keskuksia, joissa painegradientin arvo on 0.02 mbar/m ja suunta keskuksesta ulospäin. Myös kuvan (c) matalapaineen keskuksessa painegradientin arvo on 0.02 mbar/m , mutta suunta on kohti keskusta.

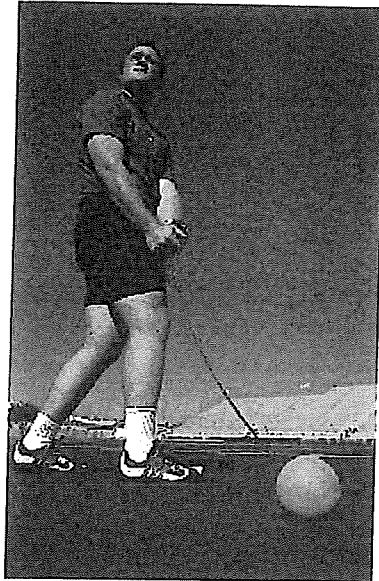
muuttumattomana, vaikka ilmanpaineen absoluuttiset arvot ja isobarien väliset etäisyydet muuttuvat. Oleellista on huomata myös se, että painegradientin, ja samalla painegradienttivoiman, suunta on aina kohtisuorassa isobareihin nähden.

2.2.2 Keskihakuvoima

Newtonin I lain mukaisesti kiihtyvässä liikkeessä olevaan kappaleeseen kohdistuu aina nollasta poikkeava nettovoima. Kun kappale on kiihtyvässä liikkeessä, sen nopeus muuttuu. Oleellista on huomata, että nopeuden muutos voi tarkoittaa kahta asiaa: vauhdin muutosta tai nopeuden suunnan muutosta. Täten kaarevalla liikeradalla oleva kappale on aina kiihtyvässä liikkeessä, sillä sen nopeuden suunta muuttuu jatkuvasti.

Keskihakuvoima F_{kh} pitää kappaleen kaarevalla liikeradalla. Jos keskihakuvoimaa ei ole, kappaleen liikerata on suora. Kun esimerkiksi autolla ajetaan kaarteessa, keskihakuvoima on seuraus renkaiden ja tien pinnan välisestä kitkasta. Jos kitkan vaikutus katoaa, auton liikerata muuttuu suoraksi yleensä ikävin seurauksin. Toinen havainnollinen esimerkki keskihakuvoimasta löytyy moukarinheitoksi kutsutusta yleisurheilulajista, kuva 2.6. Kun urheilija pyörii heittöhäkissä moukari käsissään, hän kohdistaa moukarin kuulaan vajerin välityksellä keskihakuvoiman. Kun heittäjä irrottaa vajerista, keskihakuvoimaa ei enää ole, minkä vuoksi kuula jatkaa matkaansa ympyräradan tangentin suuntaisesti. Keskihakuvoiman suunta on siis aina ympyrän keskipistettä kohti.

Ilmavirtojen liikeradat ovat harvoin suoria, joten keskihakuvoima on lähes aina läsnä. Huomionarvoista kuitenkin on, että ilmavirtauksiin liittyvä keskihakuvoima on aina seuraus muiden voimien välisestä epätasapainosta. Tähän aiheeseen palataan gradienttituulen yhteydessä luvussa 2.3.3.



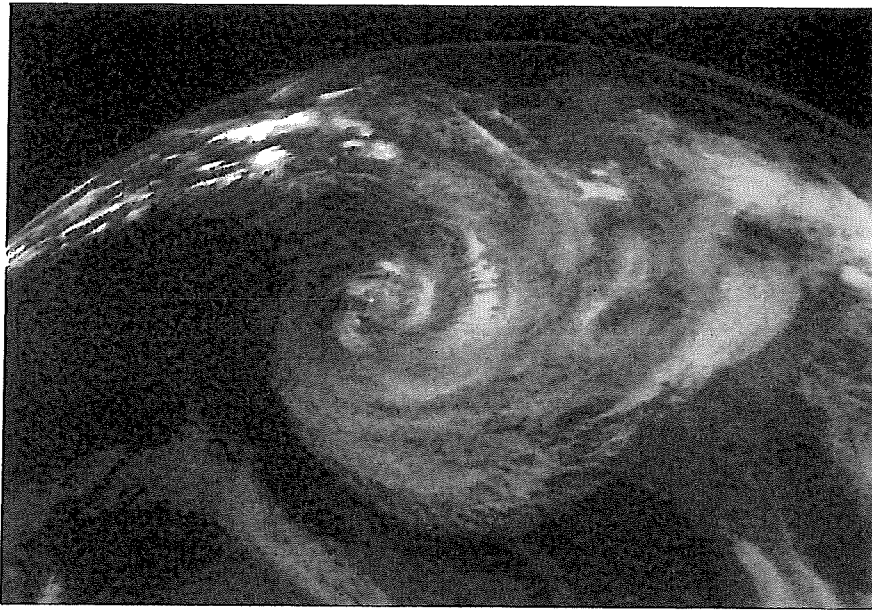
Kuva 2.6. Vaijerin päässä oleva kuula pysyy ympyräradalla niin kauan, kuin heittäjä kohdistaa kuulaan vaijerin välityksellä keskihakuvoiman. Kun heittäjä irroittaa vaijerista, keskihakuvoima menee nolllaksi, jolloin kuula jatkaa matkaansa ympyräradan tangentin suuntaisesti. (pixabay.com)

2.2.3 Coriolis-voima

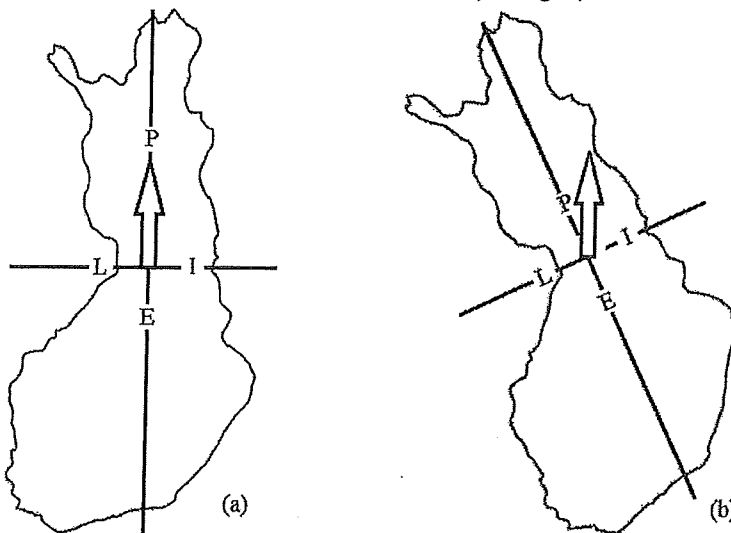
Coriolis-voima on koordinaattijärjestelmästä seuraava näennäisvoima. Havainnollistetaan tilannetta kuvaan 2.7 liittyvällä esimerkillä. Kuvittele, että kuva on näkymä omista silmistäsi. Olet siis avaruudessa ja katselet sieltä maan tapahtumia. Kun seuraat kuvassa näkyvää sykklonia, huomaat sen liikuvan suoraa rataa pitkin. Samanaikaisesti maan pinnalla oleva tarkkailija havainnoi saman syklonin liikettä, ja huomaa liikeradan olevan kaareva. Jossain määrin yllättävää saattaa olla, että molemmat havainnot ovat oikein. Kyse on siitä, että kaksi eri tarkkailijaa havainnoivat tilannetta erilaisista avaruuskoordinaattijärjestelmistä (*frame of reference*). Maanpäällinen tarkkailija käyttää tyypillistä pohjoinen-etelä, itä-länsi -koordinaattijärjestelmää, joka pyörii maan mukana. Maanpäällisen tarkkailijan mielestä koordinaattijärjestelmä ei kuitenkaan pyöri, sillä hän pyörii itse maan mukana täsmälleen samalla nopeudella. Avaruudessa oleva tarkkailija sen sijaan näkee koordinaatiston liikkeen, ja hänen silmin sykkloni näyttää etenevän suoraa pitkin.

Tarkastellaan syklonin havainnointia vielä kuvan 2.8 avulla. Oletetaan, että tarkastelun alkuhetkellä maan pinnalla on kuvan (a) mukaisesti pystysuora ilmavirtaus alhaalta ylös, ja että ilmansuuntiin liittyvä koordinaatisto on kiinnitetty maan pinnalle. Tässä vaiheessa ilmavirtauksen suunta näyttää olevan etelästä pohjoiseen sekä avaruudessa olevan tarkkailijan että maan-

päällisen tarkkailijan silmin. Jonkin ajan kuluttua maapallo on pyörinyt akselinsa ympäri sen verran, että tilanteesta on tullut kuvan (b) mukainen. Avaruudessa olevan tarkkailijan silmin ilmavirtauksen suunta on edelleen alhaalta ylös,



Kuva 2.7. Satelliittikuva Heta-syklonista 1.1.2004 (nasa.gov).



Kuva 2.8. Ilmavirtauksen käyttäytyminen maan pyörimisliikkeen seurauksena.

ja samalla ilmansuuntiin liittyvä koordinaatisto on kiertynyt maan pyörimisliikkeen seurauksena. Maanpäällisen tarkkailijan silmin tilanne on siinä mielessä päinvastainen, että ilmansuuntiin liittyvä koordinaatisto ei näytä kiertyneen, sillä tarkkailija on liikkunut maan pyörimisliikkeen mukana. Ilma-

virtauksen suunta sen sijaan näyttää kääntyneen. Toisin sanoen "alhaalta ylös" tarkoittaa maanpäällisen tarkkailijan silmin edelleen etelä-pohjoisen suuntaa, josta ilmavirtaus nyt poikkeaa. Tämän seurauksena ilmavirtauksen suunta on maanpäällisen tarkkailijan silmin kaartunut, kun taas avaruudessa olevan tarkkailijan silmin ilma virtaa suoralla radalla.

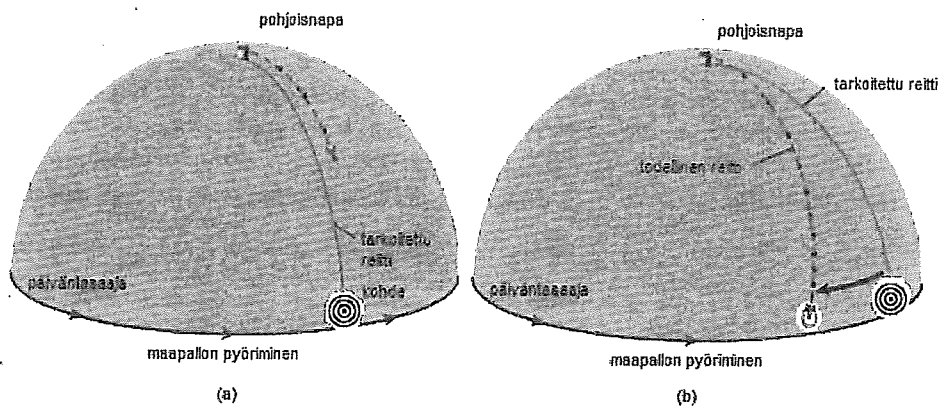
Kuten luvussa 2.2.2 todettiin, kaarevalla radalla tapahtuvaan liikkeeseen liittyy aina nollasta poikkeava nettovoima. Kun kuvan 2.8 mukaista tilannetta tarkastellaan avaruudessa olevan havainnoijan silmin, ilmavirta kulkee suoraa reittiä, joten siihen vaikuttavam nettovoiman voidaan ajatella olevan nolla. Mutta kun havainnoija onkin maan pinnalla, ilmavirta näyttää maan pyörimisliikkeen seurauksena kaareutuvan. Toisin sanoen koordinaatistojärjestelmän muuttaminen saa ilman näennäisesti kiihtyvään liikkeeseen. Tämä näennäinen kiihtyvyys on seuraus coriolis-voimasta F_c .

Coriolis-ilmiön voimakkuus saadaan leveyspiirin sin-funtiona. Ilmiö on voimakkaimmillaan etelä- ja pohjoisnavalla, joiden leveyspiiri on 90° . Päiväntasaajan kohdalla leveyspiirin astelukema on nolla, jolloin myös coriolis-ilmiön vaikutus menee nolaksi. Selitys leveyspiirin vaikutuksesta coriolis-ilmiön voimakkuuteen voidaan löytää tarkastelemalla eri leveyspiireille pystytettyjä torneja. Jos torni on etelä- tai pohjoisnavalla, se kiertyy maapallon pyörimisliikkeen seurauksena vuorokauden aikana akselinsa ympäri 360° . Jos torni sen sijaan sijaitsee päiväntasaajalla, se kiertää vuorokauden aikana maapallon kiertymättä lainkaan pituusakselinsa suhteen. Jos torni sijaitsee jollakin leveyspiirillä napojen ja päiväntasaajan välissä, kiertymistä pituusakselin suhteen tapahtuu jonkin verran, mutta ei niin paljon kuin navoilla. Tämän vuoksi coriolis-ilmiö on voimakkaimmillaan etelä- ja pohjoisnavalla, eikä vaikuta lainkaan päiväntasaajalla.

Coriolis-ilmiön vaikutussuunta riippuu siitä, kummalla maapallon puoliskolla ollaan. Pohjoisella pallonpuoliskolla coriolis-voima kääntää virtauksia kulkusuunnassa oikealle, ja eteläisellä pallonpuoliskolla virtaus kaareutuu vasemmalle. Tätä voidaan havainnollistaa kuvan 2.9 mukaisella ammus-esimerkillä. Oleellinen termi asian hahmottamisessa on *tangentiaalinen nopeus*, jolla tarkoitetaan maan pyörimisliikkeestä seuraavaa maan pinnan tangentin suuntaista nopeutta itäänpäin. Kun ollaan päiväntasaajalla, tangentiaalinen nopeus on maksimissaan, kun taas navoilla se menee nolaksi. Ammuksen kaareutuminen kuvan 2.9 mukaisella tavalla voidaan ymmärtää tangentiaalisen nopeuden avulla. Jos ammus lähetetään kuvan (a) mukaisesti pohjoisnavalta kohti etelää siten, että kohteena on päiväntasaajalla oleva maalitaulu, ammus ohittaa maalitaulun länsipuolelta kuvan (b) mukaisesti. Tämä johtuu siitä, että pohjoisnavalta lähetetyn ammuksen tangentiaalinen nopeus on nolla, kun taas päiväntasaajalla oleva maalitaulu liikkuu kohti itää suurimmalla mahdollisella tangentiaalisella nopeudella. Toisin sanoen maalitaulu karkaa ammuksen alta itäänpäin, ja ammus ohittaa taulun länsipuolelta. Täten ammuksen rata kaareutuu kulkusuunnassaan oikealle maanpäällisen tarkkailijan silmin. Jos ammus lähetetään päivän-

tasaajalta pohjoiseen kohti navalla olevaa maalitaulua, ammus ohittaa taulun itäpuolelta. Selitys löytyy jälleen tangentialisesta nopeudesta, joka on päiväntasaajalta lähetettävällä ammuksella maksimissaan, kun taas pohjoisnavalla sijaitsevalla maalitaululla se on nolla. Jälleen siis ammuksen rata kaareutuu kulkusuunnassa oikealle maanpäällisen tarkkailijan silmin. Kun kuvan 2.9 mukainen koe tehdään eteläisellä pallonpuoliskolla, havaitaan, että ammus kääntyy kulkusuunnassaan vasemmalle.

Tyyneen sään käsite kytkeytyy tangentialisen nopeuden välityksellä leveyspiiriin. Tyyni sää tarkoittaa tunnetusti sitä, että ilma liikkuu maan pyörimisliikkeen mukana täsmälleen samalla nopeudella, jolloin ilma näyttää maanpäällisen tarkkailijan silmin liikkumattomalta. Helposti voidaan kuitenkin havaita, että navoilla *tyyni sää* tarkoittaa ilman absoluuttisen nopeuden kannalta merkittävästi erilaista tilannetta kuin päiväntasaajalla. Kun navoilla on tyyntä, ilman absoluuttinen nopeus on nolla, kun taas päiväntasaajalla ilma liikkuu tyyneellä säällä merkittäväällä nopeudella itäänpäin. Tämän



Kuva 2.9. Coriolis-ilmiöstä johtuva ammuksen radan kaareutuminen pohjoisella pallonpuoliskolla.

vuoksi kuvaan 2.9 liittyvät selitykset ammuksen liikeradan kaareutumisille pätevät myös ilmavirtauksille. Kun tarkastelun alkuhetkellä sään oletetaan olevan tyyni, voidaan helpohkosti havaita, että kuvan 2.9 (a) mukainen pohjoisnavalta kohti päiväntasaajaa lähtevä ilmavirtaus kääntyy maanpäällisen tarkkailijan silmin kulkusuunnassaan oikealle, sillä pohjoisnavalla ilman tangentialinen nopeus on nolla. Mitä pidemmälle kohti päiväntasaajaa ilmavirtaus pääsee, sitä suuremmalla tangentialisella nopeudella maapallo liikkuu itäänpäin, ja koska ilma ei ole maassa kiinni, maan voidaan sanoa karkaavan ilman alta kohti itää. Samanaikaisesti maanpäällinen tarkkailija liikkuu maan pyörimisliikkeen mukana itäänpäin, joten ilmavirtaus näyttää hänen silmin kääntyvän kulkusuunnassaan oikealle. Päivän-tasaajalta kohti pohjoisnapaa lähtevän ilmavirtauksen tapauksessa tilanne on siinä mielessä päinvastainen edelliseen tarkasteluun verrattuna, että nyt ilmalla on tyyneessä lähtötilanteessa suurin mahdollinen tangentialinen nopeus. Tämän

seurauksena päiväntasaajalta kohti pohjoisnapaa lähtevä virtaus kääntyy itäänpäin, sillä maan pinnan tangentiaalinen nopeus lähestyy nollaa pohjoisnapaa kohti mentäessä. Ilmavirtaus siis kääntyy maanpäällisen tarkkailijan silmin kulkusuunnassaan oikealle. Ja kun vastaavaa ajatusmallia sovelletaan eteläisen pallonpuoliskon virtauksiin, havaitaan, että ilmavirtaukset kääntyvät kulkusuunnassaan vasemmalle. Johtopäätöksenä voidaan siis todeta, että coriolis-ilmiön seurauksena ilmavirtaukset kääntyvät maanpäällisen tarkkailijan silmin pohjoisella pallonpuoliskolla kulkusuunnassaan oikealle ja eteläisellä pallonpuoliskolla vasemmalle.

Coriolis-ilmiön vaikutuksen voimakkuus riippuu ilmavirran nopeudesta. Mitä nopeammin ilma liikkuu, sitä enemmän sen reitti kaareutuu maan pyörimisliikkeen seurauksena maanpäällisen tarkkailijan silmin. Tämä johtuu siitä, että suurempi nopeus tarkoittaa samalla suurempaa etäisyyttä aikayksikköä kohti. Kuten edellä havaittiin, pohjoisnavan ja päiväntasaajan välinen ilmavirtaus kaareutuu sitä enemmän, mitä pidemmän pohjois-eteläsiirtymän ilma tällä välillä liikkuu, sillä sitä suurempi on tangentiaalisen nopeuden muutos. Samalla logiikalla coriolis-ilmiö kaareuttaa ilmavirtausta sitä enemmän, mitä nopeammin ilma liikkuu, sillä kasvava nopeus tarkoittaa kasvavaa etäisyyttä aikayksikköä kohti. Maanpäällisen tarkkailijan silmin nopeasti liikkuva ilma siis kaareutuu aikayksikköä kohti enemmän kuin hitaasti liikkuva ilma. Tämän vuoksi coriolis-ilmiön vaikutus kasvaa ilmavirran nopeuden kasvaessa.

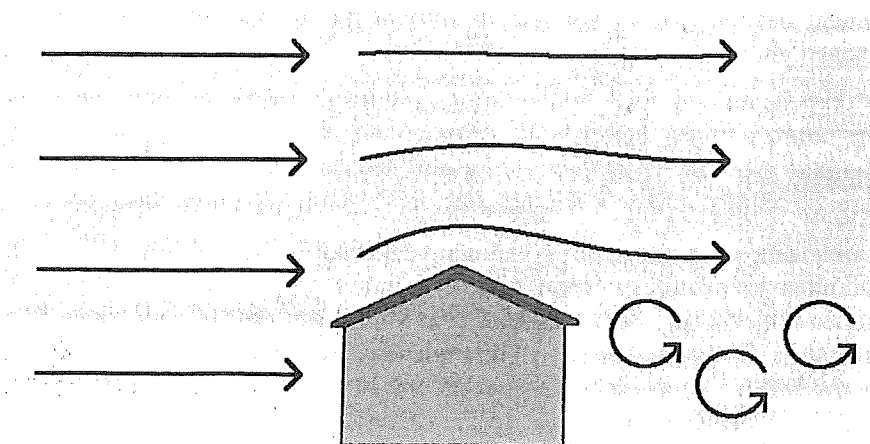
2.2.4 Kitka

Kitkalla mallinnetaan liike-energian muuttumista lämpöenergiaksi. Puhekielessä kitkalla tarkoitetaan yleensä liikettä vastustavaa voimaa kiinteiden kappaleiden välillä, mutta laajemmin ajateltuna kitkasta voidaan puhua yllättävissäkin yhteyksissä. Kitka on otettava huomioon nesteiden ja kaasujen liikkeen mallinnuksessa, joten sillä on vaikutuksensa myös ilmavirtauksiin. Ja jos halutaan hakea äärimmäinen esimerkki kitkasta, voidaan tarkastella sähkötekniikasta tuttua luonnonilmiötä, jota mallinnetaan resistiivisyydellä. Kyse on suureesta, jolla mallinnetaan varausten liike-energian muuttumista lämpöenergiaksi. Mikrokooppisesti kyse on varausten törmäilystä toisiinsa ja aineen kiderakenteeseen, ja näissä törmäyksissä osa varausten liike-energiasta muuttuu lämpöenergiaksi, mikä on makrokooppisesti havaittavissa virrallisen sähköjohdon lämpenemisena. Tämän vuoksi resistiivisyydessäkin on pohjimmiltaan kyse kitkasta.

Kaasujen ja nesteiden virtauksen kitkaa kutsutaan *viskositeetiksi*. Kun ollaan mikrokooppisella tasolla ja tarkastellaan molekyylien liikettä toisiinsa nähden, puhutaan *molekyyliviskositeetista*. Ilmavirtausten kannalta molekyyliviskositeetilla ei kuitenkaan ole makrokooppisessa mittakaavassa merkitystä, sillä kyse on lähinnä molekyylien satunnaiseen liikkeeseen liittyvän kitkan mallintamisesta. *Pyörreviskositeetti* sen sijaan on suure, joka tulee

ottaa huomioon ilmavirtausten mallinnuksessa. Pyörreviskositeetilla tarkoitetaan esteiden aiheuttamaa virtauskitkaa, josta nimensä mukaisesti seuraa pyörteitä alkuperäiseen virtaukseen. Ja koska pyörteiden energia on peräisin alkuperäisen virtauksen energiasta, pyörreviskositeetti hidastaa virtauksen nopeutta. Kuvassa 2.10 on periaatteellinen esitys pyörreviskositeetin vaikutuksesta ilmavirtaukseen. Tuulen suunnasta katsottuna esteen taakse muodostuu pyörteitä, minkä seurauksena esteen takana ilmavirtauksen nopeus on pienempi kuin etupuolella. Toisaalta pyörreviskositeettia voidaan myös käyttää hyväksi. Tästä on esimerkki kuvassa 2.11, joka esittää tyypillistä lumiaitaa. Kun lunta halutaan kerätä aukealle paikalle tai vaikkapa estää lumen kertyminen tielle, kohde voidaan suojata lumiaidalla. Koska ilmavirtaus hidastuu tuulen suunnassa aidan takapuolella, virtauksen energia ei ole enää riittävä lumen kuljettamiseen, joten lumi kasautuu pyörreviskositeetin seurauksena aidan taakse.

Yleisesti ottaen tuulen nopeus on sitä suurempi, mitä korkeammalla maan pinnasta ollaan. Pääosin kyse on kitkan vaikutuksesta, sillä mitä kauempana maan pinnasta ollaan, sitä vähemmän maanpäälliset rakenteet ja pinnanmuodot vaikuttavat ilmavirtaukseen. Kitkan vaikutuksen vähentäminen onkin tärkein syy esimerkiksi siihen, miksi tuulivoimaloiden tornien korkeudet jatkavat vuosi vuodelta kasvuaan, sillä pyörreviskositeetti heikkenee nopeasti maan pinnalta etäännyttäessä. Noin kilometrin korkeudella maan pinnasta voidaan hyvällä tarkkuudella olettaa, ettei pyörreviskositeetti enää vaikuta ilmavirtauksiin. Tätä noin kilometrin paksuista ilmakehystä, jossa pyörreviskositeetti vaikuttaa, kutsutaan *kitkakerrokseksi* tai *raja-kerrokseksi*. Kitkan vaikutus voidaan siis jättää huomioimatta, kun mallinnetaan ilmavirtauksia rajakerroksen yläpuolella. Rajakerroksessa kitka sen sijaan vaikuttaa merkittävästi ilmavirtauksiin, kuten tullaan huomaamaan luvussa 2.3.4.



Kuva 2.10. Periaatekuva pyörreviskositeetin vaikutuksesta ilmavirtaukseen.

Aki Korpela

TUULIVOIMAN PERUSTEET

Tuulivoiman perusteet kirjan pääasiallinen tarkoitus on tarjota lukijalle kattava perusasioiden ymmärrys tuulivoimasta.

Kyseessä on monipuolinen ja poikkitieteellinen ala, jonka vahva osaaminen edellyttää ainakin sähkötekniikan, mekaniikan, virtausopin ja meteorologian hallintaa. Oikotietä onneen ei kuitenkaan ole olemassa, ja siksi tässä teoksessa pääpaino onkin perusasioiden selkokielisellä käsittelyllä. Mikään kirjoitettu teksti ei tietenkään pysty suoraan tarjoamaan ymmärrystä, joka on lopulta mahdollista saavuttaa vain lukijan oman ajatustyön seurauksena.

Tuulivoiman perusteet on kuitenkin pyritty kirjoittamaan niin, että se helpottaa ajatustyön tekemistä ja saa toivottavasti lukijansa kiinnostumaan aiheesta entistä enemmän. Kirjassa tuulen käsittely alkaa ilmavirtauksiin vaikuttavien voimien tarkastelulla, mistä edetään tuulen tehoon ja edelleen tuulivoimalan roottorin toimintaan. Kirja antaa myös käsityksen siitä, millaisia generaattoriratkaisuja erilaisissa tuulivoimalatyypeissä käytetään, ja miten tuulivoimalan energiantuotantoa voidaan arvioida kohtuullisen yksinkertaisilla menetelmillä.

Tervetuloa tutustumaan kirjan avulla tähän mielenkiintoiseen, ajan-kohtaiseen aiheeseen.

ISBN 978-952-5491-84-5



9 789525 491845

K 621.3
2016

www.tammertekniikka.fi

 **Tammertekniikka**