

NIJE SVAKA MALO JAČA OLUJA, TE NASTALE ŠTETE OD NJE NASTALA IZ SUPERSTANIČNOG CUMULONIMBUSA, ŠTO MEDIJI U POSLJEDNJE VRIJEME ČESTO KORISTE BEZ ARGUMENATA

Sada si novinari daju slobode da svaku malo jaču oluju proglase superstanicom, kao da se pojavljuju svaki dan. I reći će normalno da je to posljedica klimatskih promjena. Nisu i ne mogu one biti toliko česte, nego se pojave jednom ili ni jednom godišnje, kao velike izolirane tvorevine dugog vijeka trajanja s štetom u dužini i do 100 km, koje zbog svoje strukture ne dozvoljavaju stvaranje novih stanica u njihovoj blizini.

NAJBOLJI POKAZATELJ OVAKVE OLUJE JE NJENA RADARSKI OSMOTRENA STRUKTURA I VIJEK TRAJANJA OD VIŠE SATI

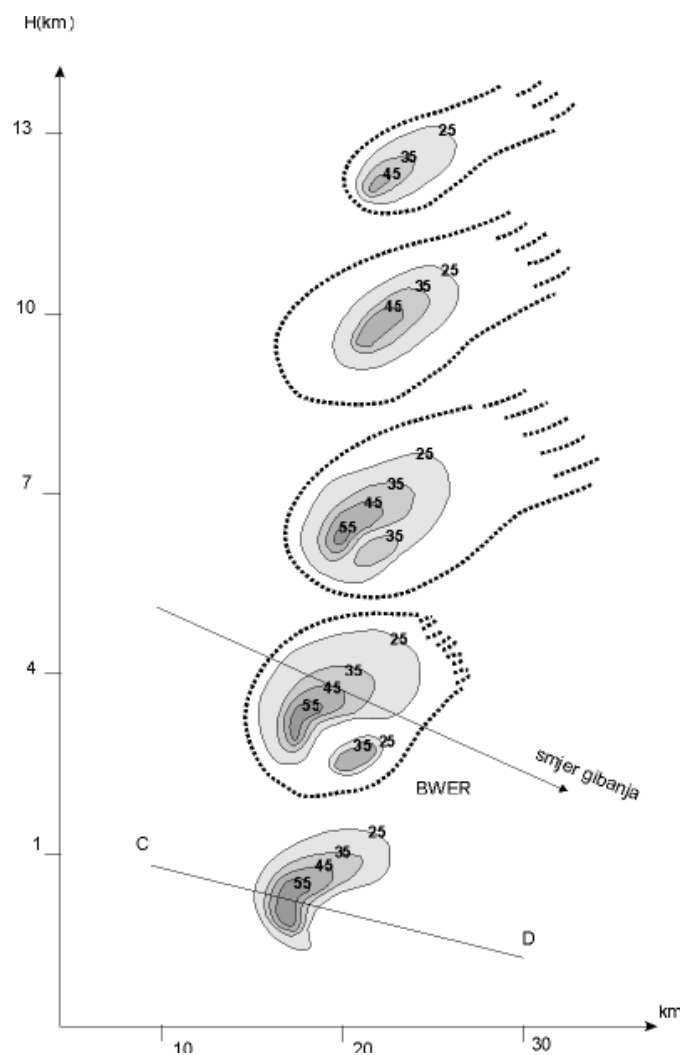
STRUKTURA RADARSKIH ODRAZA I DINAMIKA RAZVOJA SUPERSTANIČNIH PROCESA

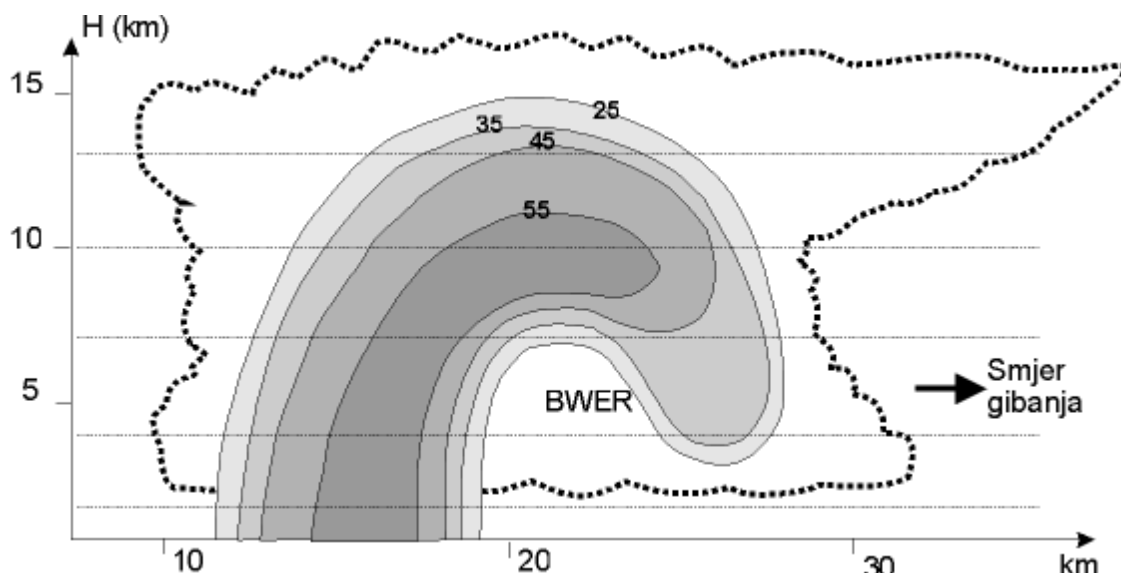
Ovaj konvektivni proces ima jednostaničnu strukturu, a radarski odraz je kružnog ili eliptičnog oblika sa horizontalnim dimenzijama 20-50 km (u srednjoj vrijednosti) i visinom od 12 do 15 km, pa i većom. Ovaj oblak ima na desnom boku prostranu zonu (5 do 15 km) snažne uzlazne struje (20-40 m/s) koja se probija do 10 km visine. To je na radarskom pokazivaču oblast slabog radarskog odraza koja je ograničena sa gornje strane svodom snažnog radarskog odraza, nadstrešnicom radarskog odraza na frontalnom dijelu i dijelu desnog boka, zatim odrazom visokog gradijenta reflektiranog signala i izraženom nadstrešnicom u obliku kuke ili privjeska (HOOK odraz) koja obuhvaća i prizemni sloj. Na nižim razinama na stražnjoj desnoj strani oblaka, ta pojava kuke ili privjeska se proteže u desno od smjera kretanja oluje. Sama oblast uzlazne struje se premješta paralelno sa tučonosnom jezgrom i to konstantnom brzinom 25 do 50 km/h.

U momentu maksimalnog razvoja superstanice u radijusu od nekoliko desetina kilometara zapaženo je da se druge stanice ne stvaraju. Superstanični oblak ima dugi životni ciklus trajanja do 6 sati pa i više, a praćen je katastrofalnom pojavom tuče trake širine 10 do 15 km i dužine nekoliko desetina kilometara, a ponekad i 100 km (**npr. nepogode u Hrvatskoj i susjednim zemljama osmotrene 03.08.1983., 23.05.1984., 31.07.1985., 25.07.1987., 18.08.1991. i 17.06.1997.**). Uzlazna struja skreće u pravcu lijevog boka i skreće silaznu zračnu struju na visini njenog stvaranja. Tako se prostorno razgraničava oblast uzlazne struje i oborinske zone (silazne struje) što isključuje mogućnost gušenja ili narušavanja uzlazne struje oborinskom zonom, a to osigurava stabilnost procesa održavanja života superstanice. Inače, evolucija superstanice se sastoji od faze

rasta, zrele faze i faze raspadanja. Do razvoja nove superstanice dosta rijetko može doći 1 do 2 sata kasnije i to 40 do 70 km južnije od prethodno stvorene stanice. Brzina premještanja takve nepogode u srednjoj vrijednosti je 20 do 40 km/h, ali su bile i zabilježene brzine u pojedinim situacijama bliske i 100 km/h. Djelovanjem sistema OT na superstanične procese, može se za sada provesti operativno zasijavanje raketama tog sistema na donjoj granici efikasnosti i uspješnosti, baš zbog gore navedenih osobina samog konvektivnog procesa. Takozvani BWER (buonded weak echo region) je područje unutar odraza na RHI ekranu (vertikalni presjek oblaka), gdje je signal veoma slab, ili ga nema. To je, ustvari, vertikalni presjek odraza u obliku kuke na PPI ekranu (horizontalni presjek oblaka). Iznad toga je nadstrešnica (nakovanj - incus) koja je povezana sa pojavom tuče i jakog vjetra.

Shema dinamike razvoja superstaničnog procesa i vertikalni presjek





KONVEKCIJA U ATMOSFERI

Konvektivne stanice otpočinju svoj razvoj iz tzv. termala, tj. skoro vertikalnog mlaza toplog zraka (poput gljive). Ovi se javljaju zbog nehomogene podloge i prikladnih lokalnih mikrodinamičkih uvjeta (npr. smicanje na skali $\Delta x \approx 500$ m) pri super-adijabatičkom vertikalnom temperaturnom gradijentu. Koncept CAPE-a (konvektivna raspoloživa potencijalna energija) je vrlo koristan u izvantropskim širinama, dok u tropskim krajevima je od manje koristi, jer su tamo nerjetko drugačiji mehanizmi duboke mokre konvekcije (latentna toplina, tipovi strujanja, itd. jer u tropima gotovo uvijek postoji CAPE). Na mezoskali postoje tri osnovna tipa : **jedinične, multi- i superstanice**. Ako je vertikalno smicanje u donja 4 km atmosfere relativno malo, otprilike $<10\text{m/s}/(4\text{km})$ kroz spomenutu dubinu atmosfere, mogu se pojaviti samo jedinične stanice, tj. obični Cu con (Cumulus congestus) i eventualno manji Cb (Cumulonimbus).

Kratkog su trajanja, ~ 30 do 60 min, dimenzije $L_x \sim 5$ do 10 km. Obično se gibaju unutar srednjeg strujanja u donjih ~ 8 km atmosfere, dajući umjereni pljusak u trajanju od 10-ak minuta. Kada je vertikalno smicanje u donja 4 km umjereno jako, ~ 10 do 20 m/s/(4km), stvaraju se multistanice. Sastavljene su od više jediničnih Cb-a kratkoga vjeka trajanja, ali u cjelini traju više sati, recimo 6 do 10 sati. Multistanice daju kvazi-periodične pljuskove u trajanju od nekoliko sati, ili dulje, ovisno o tome da li postoji mehanizam obnavljanja multistanica; mogu dovesti do lokalnih poplava. Grupa multistanica može stvoriti olujnu mezoskalnu frontu, s izuzetno jakim horizontalnim smicanjem vjeta, grmljavinom i jakim pljuskovima; takve olujne formacije se često nazivaju „squall-line“.

Ove olujne tvorevine, „olujne pruge“, točnije (kvazi) linijski organizirani konvektivni sustavi (LOKS) najčešće nisu direktno povezane sa sinoptičkim frontama, češće se javljaju u toplom sektoru ciklone, duge su nekoliko stotina km, a široke su nekoliko desetaka km. Ako postoje prikladni uvjeti, multistanice se mogu regenerirati tijekom nekoliko dana i tako najjednostavnije dovode do poplava nad određenim područjem. Nije sasvim jasno kada nakupina multistanica može formirati LOKS, a kada i zašto se to u drugim uvjetima ne dogodi. Spomenuti LOKS-ovi mogu biti dugi nekoliko stotina km, široki su nekoliko desetaka km, ili ~ 100 km, te mogu trajati od nekoliko sati do čak i nekoliko dana; stvaraju olujan vjetar i tuču. Dugo-postojeći LOKS-ovi se nazivaju „*derechos*“ (španjolski: ravan); putuju više stotina km i mogu proizvesti veliku štetu, zbog vjetera i tuče na širem području svojeg pojavljivanja. I tornada se nekad mogu pojaviti oko prednjeg ruba olujnih pruga, mada se oni najčešće javljaju u superstaničnim Cb-ima. Svi Cb-ovi mogu proizvesti sijevanje i grmljavinu, ako imaju dovoljno ledenih kristala. Većina olujnih oblaka bez značajne ledene faze ne mogu proizvesti munje, jer je međusobno sudaranje kristalića leda ono što primarno dovodi do stvaranja elektriciteta u oblacima. Sijevanje je rezultat razdvajanja električnog naboja unutar olujnog oblaka nastalog zbog mokre konvekcije.

Izmjerena kratkotrajna struja tijekom sijevanja munja iznosi preko 104 A, ponekad čak i preko 105 A; pripadni električni napon može prijeći i višestruko 106 V. Pri tome dolazi i do grmljavine, jer se pri proboju naboja do podloge zrak naglo širi, prelazeći kratkotrajno iz plinovitog stanja u plazmu, pri temperaturi i do iznad 2×10^4 C; to dovodi do udarnog zvučnog efekta. Postoje određene najnovije indikacije da pri jakome sjevanju i grmljavini dolazi čak i do kratkotrajnog stvaranja γ -zraka uz anihilaciju elektron – pozitron.

Superstanice mogu biti samostalne ili međusobno organizirane; tada se često puta radi o tzv. mezoskalnom konvektivnom sustavu ('mesoscale convective system', MCS) koji nerjetko dovodi do poplava na svojem putu. Ako MCS sporo putuje, može dovesti do katastrofalnih poplava na području veličine npr. dvostruke Slavonije. Jedna od osnovnih osobina im je razvoj vlastite rotacije. Superstanica ima vrlo organiziranu unutrašnju strukturu, što joj omogućuje kontinuirano propagiranje i trajanje od više sati. Mnoge superstanice proizvode karakteristični zavijutak u svojem Doppler-radarskom odrazu polja brzine („kuka“ ili „udica“, eng. '*hook*'); to je najčešći znak da može doći do tornadogeneze i pojave tornada, mada tek relativno mali broj ovih „udičastih“ odraza doista dovode do tornada. Iako superstanice mogu u ekstremnim uvjetima stvoriti tornada, sva tornada ne nastaju nužno iz superstaničnih oblaka. Tornadogeneza nije sasvim objašnjen proces; radi se o zakretanju i podizanju izuzetno jake horizontalne vrtložnosti ('*tilting*'), gdje latentna toplina igra važnu, ali još ne do kraja razjašnjenu ulogu.

Tornado se razvija u području gdje se susreću strujanje uvjetno nestabilnog okoliša i izlazni tok ('*gust front*') iz super-oblaka, što najčešće predstavlja okludiranu mezo-frontu; to međudjelovanje se javlja ili ispod tzv. mezociklone (jer superstanica razvija svoju vlastitu vrtložnost), ili pri najisturenijem dijelu izlaznog toka.

Neka od najnovijih saznanja o evoluciji tornada mogu se naći u Orf i sur. (2017) zahvaljući najmodernijim super-računalima i naprednoj vizualizaciji. Nedostatak pouzdanih mjerenja je glavni razlog nedovoljnog poznavanja tornadogeneze.

Radarskim putem dobivamo tzv. radarsko dual dopplersku sintezu horizontalnog polja vjetra (korištena 2 Doppler radara) jednog superstaničnog Cb-a što je proizveo i tornado. Prisjetimo se da udari vjetra u jakom tornadu nastaju u olujama, gdje vlažan i topao zrak presreće relativno hladan i suhi zrak, pa gibajući se različitim brzinama i smjerovima međudjeluju i stvaraju vrtlog, te prelaze 100 m/s, što većina standardnih anemometara ne može izdržati. Mini tornada su 'domaće' pijavice. One također mogu podizati krovove kuća i preokretati manje objekte (barke, motore, i sl.). Postojanje značajnog CAPE-a, npr. preko 1000 J/kg, perzistentnog Ri, BULK između otprilike -15 i -45 (jer je $N^2 < 0$; ako je definiran pomoću CAPE-a u brojniku, onda je pripadni Ri, $BULK > 0$ kao što je već bilo spomenuto), te dovoljno vlažnosti u atmosferskom graničnom sloju su bitan preduvjet za formiranje superstaničnog Cb-a i eventualnu tornadogenezu. Najčešća kratka prednajaava tornada je pojava tzv. „*wall cloud*-a“, tj. zida oblaka neposredno ispod glavne podnice Cb-a. Ovi traju barem 10 min, imaju očitu rotaciju i jasno vidljiva jaka silazna i uzlazna gibanja iz kojih se onda može spustiti tornado. Nerjetko zid oblaka nije vidljiv zbog jakog pljuska i prašine. Prema Linu (2007), superstanični Cb-i se rijetko pojavljuju izvan intervala $-10 < Ri, BULK < -50$, jer je s jedne strane premali CAPE da se razviju jaki vertikalni konvektivni mlazovi, ili pak s druge strane, srednje vertikalno smicanje vjetra je preslabo da balansira i značajno međudjeluje s CAPE-om.

Bez satelitskih i radarskih mjerenja s jedne strane, te detaljnih numeričkih simulacija zadovoljavajuće rezolucije i parametrizacije mokrih procesa, s druge strane, nije moguć dalji napredak u proučavanju i praćenju duboke konvekcije.

Dinamika olujnog vremena je posebno poglavlje mezoskalne meteorologije koje dotičemo nekoliko puta u ovom tekstu. Vjerojatno je da će ovo poglavlje progresivno dobijati sve više na važnosti u znanosti i u ljudskim aktivnostima, jer zagrijavajući zrak može sadržavati progresivno više vlažnosti u sebi, nego hladan zrak. Nadolazeće projekcije mikroklimе cijelog Jadrana, Slavonije, itd. neće moći zaobići dinamiku i statistiku pripadnih mezoskalnih oluja.

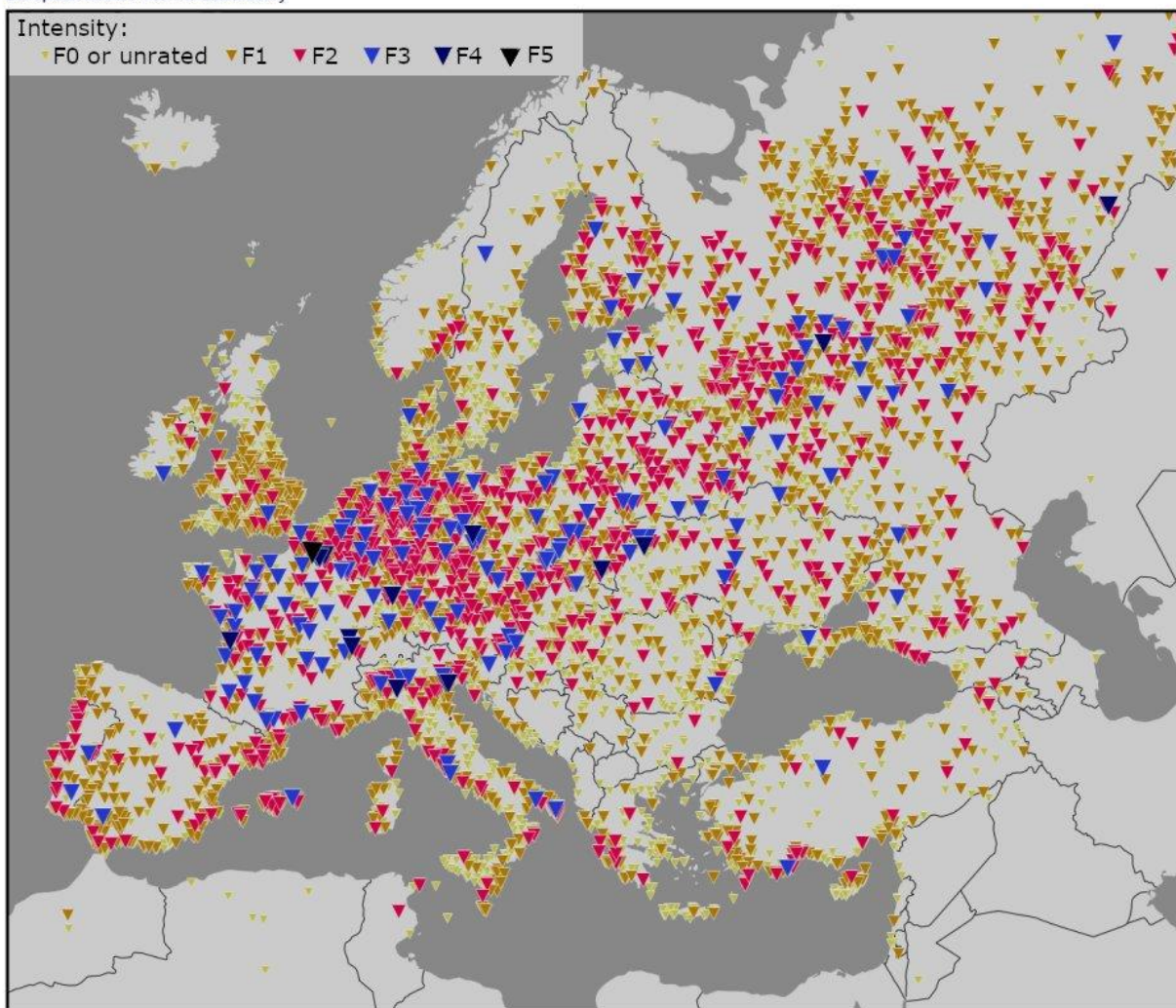
Na DHMZ-u postoje znanstveni projekti u kojima se meteorolozi već godinama bave ovom problematikom nad širim područjem Hrvatske.

NISU POJAVE TORNADA U EUROPI OD JUČER, JER ONI POSTOJE I PRIJE OVIH DOLJE ZABILJEŽENIH U SEDAMDESET GODINA



Tornadoes in Europe 1950-2020

recorded in the European Severe Weather Database (eswd.eu)



KONVEKTIVNE OLUJE I VRTLOŽNOST U SUPERSTANICAMA

To su oluje koje su nastale pod utjecajem tzv. intenzivne duboke mokre konvekcije. Ovdje proučavamo razvoj intenzivne vrtložnosti u pripadnim konvektivnim 'super-oblacima'. Podsjetimo se da postoje tri primarna tipa konvektivnih oblačnih stanica: jedinična, multi-, te superstanica. Važne veličine koja govore o jačini konvekcije su CAPE i vertikalna brzina, te vertikalno smicanje osnovnog vjetra.

U jediničnoj i multistanici se javlja i silazno gibanje, relativno blizu uzlaznom mlazu, nakon nekog vremena, inducirano oborinom, koje nakuplja hladni zrak blizu tla. Razvitak novih se javlja pri udarima vjetra, kad hladan zrak diže ili gura nestabilan zrak nakupljen ispod i ispred oblaka pri tlu. Pri horizontalnoj brzini većoj od 20 m/s ispod 4 km visine, što znači, jako vertikalno smicanje vjetra, javlja se konstruktivno mješanje konvektivnih strujanja (dakle i postojanje razlika u vertikalnoj brzini), što će produljiti razvoj olujnog sustava čak i do nekoliko sati, jer u ovom slučaju silazno gibanje je podalje od uzlaznog gibanja, te ga ne ometa.

To će rezultirati razdjeljivanjem konvektivnog sustava u dvije olujne stanice (između pada oborina), lijevo i desno obzirom na srednji vjetar u troposferi. Ako je smicanje vjetra visinom istog smjera, tj. nema zakretanja vjetra, onda su razdijeljeni dijelovi superstanice u idealiziranim uvjetima isti. No ipak, u prosjeku na sjevernoj hemisferi prevladava anticiklonalno smicanje vjetra kroz slabo-stratificiranu donju troposferu (poput Ekmanovog sloja); stoga, obično lijeva brzo odumire (jer joj nije naklonjeno prosječno vektorsko smicanje srednjeg vjetra visinom), dok se u desnoj stanici otpočinje, odnosno nastavlja razvijati snažna rotacija i eventualno čak mezoskalna cirkulacija vjetra (mezo-ciklona).

Takva superstanica, povezana s vlastitom mezo-ciklonom, će proizvesti jake oborine, tuču, te možda pijavicu ili čak tornado. Nakupine multi i superstanice često su organizirane. Glavna forma organiziranja jake duboke konvekcije je mezozkalni konvektivni sustav; MCS može biti linearnog ili kružnog oblika, obično se radi o nakupini velikih olujnih oblaka. U MCS-e spadaju mezoskalni konvektivni kompleksi (MCC) i tzv. LOKS-ovi (*squall lines*) u izvantropskim širinama, te tropske ciklone (uglavnom nemaju fronte i posjeduju toplu jezgru) i konvektivne oblačne nakupine u tropima. MCS je veći od pojedine konvektivne stanice, ali je najčešće manji od Rossbyjevog radijusa deformacije; to znači da su im horizontalne dimenzije reda veličine 100 km, traju barem 3-4 sata, dok pripadna (prateća) stratiformna naoblaka može postojati i nekoliko dana. Zbog svojih nemalih dimenzija i intenziteta (prijenos energije, topline i vlažnosti), MCS-ovi utječu i na opću cirkulaciju atmosfere. Sastoje se od običnih (jednostaničnih), multistaničnih i/ili čak superstaničnih oblaka.

Nalet hladnog zraka što ponekad osjetimo u vrućem ljetnom danu može nam biti zadnje upozorenje prije nego stigne olujno nevrijeme s jakom oborinom. Taj zrak je ohlađen isparavanjem kišnih kapi i obično se spušta kroz unutrašnjost oluje, prije no što se raširi naokolo nad podlogom. Općenito, MCS imaju dvije glavne podstrukture strujanja: topao i vlažan mlaz zraka prema gore što

„hrani“ sustav i hladni, relativno suhi mlaz prema dolje što prazni sustav. Ovaj hladni dio silaznog strujanja može započeti nove olujne oblake u uvjetno nestabilnom vlažnom zraku i tako pokrenuti 'lančanu' reakciju.

Intenzivni LOKS-ovi (*squall lines*) mogu putovati različitim smjerovima od individualnih oluja, žive po nekoliko dana (*squall lines* se obično nalaze u toplom sektoru, nekoliko stotina km ispred hladne fronte) i vjerojatno su najbrže (skoro linearne) forme MCS-a. Kao i u ostalim MCS-ima, pojedine konvektivne stanice žive (puno) kraće od sustava, tj. LOKS-a. Ove je pak nerjetko teško razlikovati od intenzivnih kišnih pruga ('*rainbands*').

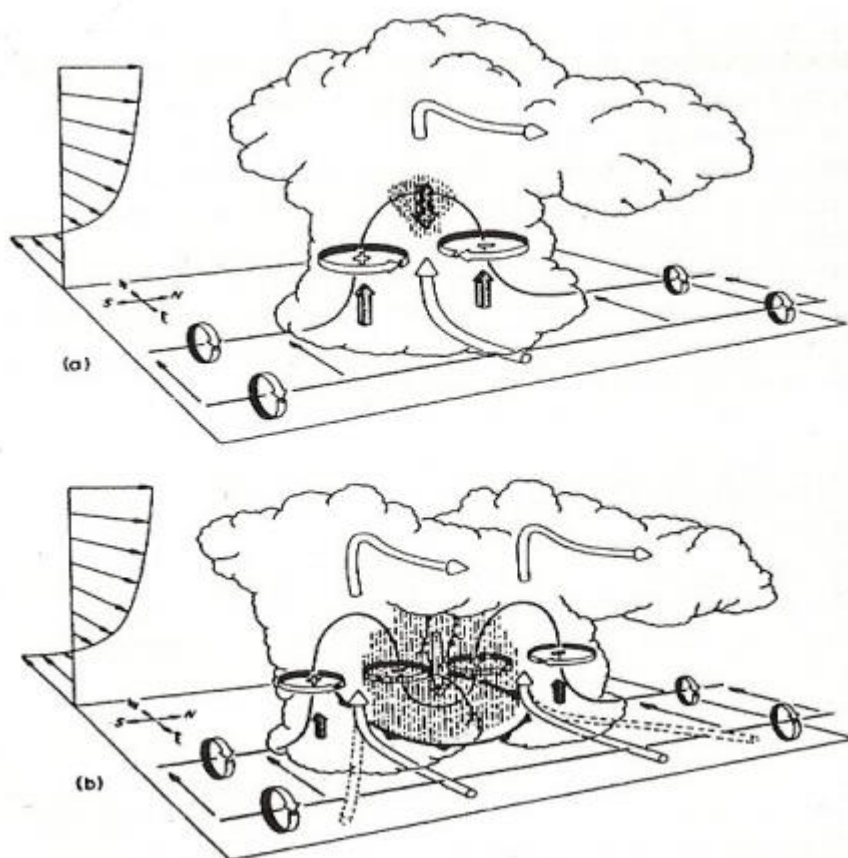
Druga vrlo organizirana vrsta MCS-a je spomenuti MCC; prepoznaju se u satelitskim snimkama kao veliki, gotovo kružni dugotrajni hladni oblačni štit. Mogu nastati i od prethodnih LOKS-a. Traju u prosjeku 15-ak sati, vrhovi pripadnih oblaka imaju temperaturu ispod -52°C , dok im ukupna površina može prijeći čak $200\,000\text{ km}^2$, to znači da im je pripadni Rossbyjev broj, $Ro \sim 1$. Nerjetko se javljaju ispred sinoptičke kratkovalne doline u srednjoj i gornjoj troposferi, karakterizirane značajnim vertikalnim brzinama; primarno forsiranje im dolazi od tople advekcije u donjoj troposferi. U razvijenoj formi MCC-a tipičan im je topli vertikalni mlaz okružen mezoskalnim konvektivnim vrtlogom, hladna anticiklonalna jezgra blizu tropopauze i hladno, obično nevremensko prizemno područje mezoskalnog visokog tlaka ('*mesohigh*') zbog izlaznog silaznog strujanja iz oblaka.

Primijetimo da je tzv. *mesohigh* povezan s ružnim vremenom, formiran je rashlađivanjem zraka zbog padajuće isparavajuće jake oborine i/ili tuče; pri tlu nerjetko proizvodi vlastiti '*gust front*' (mini fronta jakog udara relativno hladnog vjetra). Većina MCC-a se javljaju u zavjetrini velikih planina, nad tlom gdje su česte niske mlazne struje koje mogu dovoditi zrak relativno velikih vrijednosti θ_e , te gdje je CAPE dovoljno velik obzirom na okolna područja.

Duboka (smatra se i mokra, ako se ništa drugo ne spomene) konvekcija u principu dovodi do intenzivne oborine. Isparavanje oborine što ispada iz konvektivnih oblaka proizvodi hladni silazni zračni mlaz (engl. *cold downdraft*), tj. silaznu turbulentnu struju. Taj mlaz rezultira u relativno hladnom širećem, kvazi-radijalnom strujanju (*outflow*), koji putuje nad podlogom kao relativno gušća i hladnija struja (*density current*). Kad ta struja naiđe na relativno topliji i vjerojatno vlažniji, te možda i uvjetno-nestabilan zrak u atmosferskom graničnom sloju, hladna struja se podvlači pod topliji okolni zrak i ovaj se počinje uzdizati. To onda često dovodi do nove konvekcije i novog oblaka. Pripadni oblačni sustavi, npr. mezoskalni konvektivni sustavi (MCS), mogu putovati horizontalno preko nekoliko stotina kilometara i pritom dovodeći do

značajnog uzdizanja zraka. Mehanizmi stvaranja MCS-a, i posebice LOKS-ova (*squall lines*), mogu biti povezani s uzgonskim ili uzgonsko-inercijskim valovima, te njihovim međudjelovanjem s hladnim zrakom u mokroj atmosferi.

Valovi pri tome proizvode područja konvergencije i divergencije u donjoj troposferi, što dovodi do koncentrirane konvekcije u konvergentnim područjima i pojačavajući koherentnost pokretačkog mehanizma organizirane konvekcije te samog vala. Konvekcija daje energiju, a val daje karakterističnu selekciju dominantne skale i organizacije konvekcije. Time se proizvodi samoodržavajući konvektivni sustav, poznat kao tzv. valni-CISK sustav (*'Convective Instability of the Second Kind'*, CISK). Ipak, ima puno MCS-a koji nemaju karakteristike CISK-a (npr. mnogi MCS-i se ne gibaju brzinom spomenutih valova).



Ilustracija početnog razvoja superstanice; osnovni vjetar i strane svijeta su prikazane lijevo, masne kružne strelice prikazuju vrtložnost, otvorene savijene strelice predstavljaju ulazeći (dolje) i izlazeći zrak (gore) - sve u sustavu gibanja oblaka, četvrtaste strelice prikazuju uzlazno gibanje, osjenčano područje sa silaznom strelicom predstavlja početak oborine, a tanke prizemne strelice su nadolazeći zrak.

(b) Stanje oblačnog sustava u kojem je već došlo do razdvajanja; fronta udara vjetra (*'gust front'*) je skicirana ispod glavne stanice, gdje je počelo razdvajanje

superstanice. Sustav kratko nastavlja gibanje kao dva Cb-a (prema Holtonu, 1992 i Klempu 1987)

Razvoj vrtložnosti u superstanicama

Superstanice su od posebnog značaja, jer imaju tendenciju razvoja rotirajućih mezociklona u početno (vertikalno) nerotirajućem zraku. One bitno doprinose vodnoj bilanci mnogih krajeva u svijetu i stoga je njihovo proučavanje progresivno sve važnije u znanosti, meteorološkim službama kao i u mnogobrojnom agencijama za primjene meteoroloških i hidroloških rezultata. Može se pokazati da rotacija Zemlje nije relevantna u razvoju rotacije u superstanicama (trajanje konvektivnog procesa!). Iako bi za detaljno razumjevanje procesa koji vodi razvoju superstanice trebalo uzeti u račun i promjenu u stratifikaciji (tj. gustoću i temperaturu po vertikali) u atmosferi, a u daljnim razmatranjima se to zanemaruje, odnosno dovoljno je koristiti Boussinesqovu aproksimaciju da objasnimo kvalitativno bit ove rotacije.

Analiza superoluje 19.7.2023. koja je poharala sjeverozapadnu Hrvatsku

20.07.2023.

autor: Nebojša Subanović

mjesto radnje: Hrvatska

Ovaj osvrt na superoluju od 19. srpnja. 2023. je dio mog istraživanja u sklopu kursa Mezoskalna meteorologija (Prof. Branko Grisogono) na doktorskom studiju na PMF-u u Zagrebu.

Nevrijeme koje je 19. srpnja 2023. godine protutnjalo sjeverozapadnom Hrvatskom, te prešlo u Srbiju i Bosnu i Hercegovinu, primjerenije je Teksasu nego ovom dijelu Europe. Nije da je nepojmljivo, prije bih rekao da nije uobičajeno za naše podneblje. Valja se prisjetiti nevremena sredinom sedamdesetih godina prošlog stoljeća kada je tornado na Medvednici poharao prilično veliki komad bukove šume čupajući s korijenom stabla promjera većeg od jednog metra.

Kakva se to oluja obrušila na Zagreb da su dva čovjeka izgubila život, a deseci ranjeni? Meteorološkim rječnikom, radilo se o superćeliji.

Superstanica je vrlo razvijeni kumulonimbus, olujni oblak koji spada u razred oblaka vertikalnog razvoja. Za razliku od „običnih“ kumulonimbusa, kod superćelija je uočljiva rotacija sustava, najčešće ciklonalna ili protusatna, pri čemu se vrlo često javljaju tornada i tuča velikih zrna – veličine oraha, pa čak i

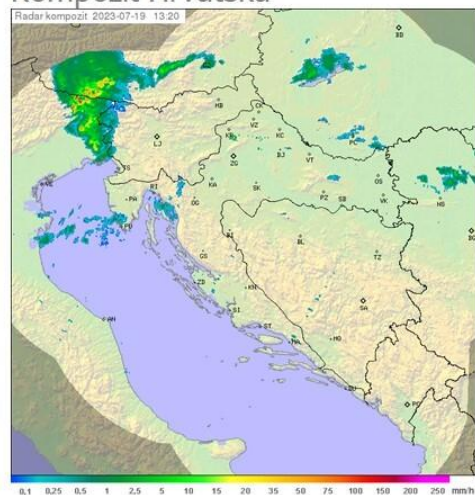
teniskih loptica. Naravno, neovisno o mogućoj pojavi tornada, superćelije su praćene i orkanskim vjetrom.

Kronološki razvoj situacije

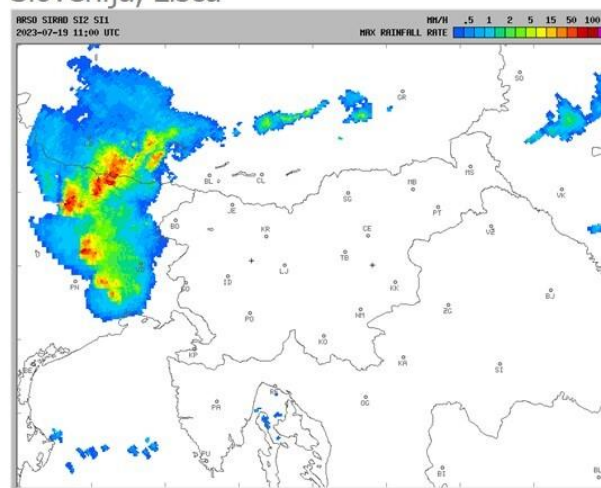
13:00

Oko 13 sati po lokalnom vremenu, na istoku Italije i jugozapadu Austrije dolazi do umjerene konvekcije i stvaranja oblaka vertikalnog razvoja.

Kompozit Hrvatska



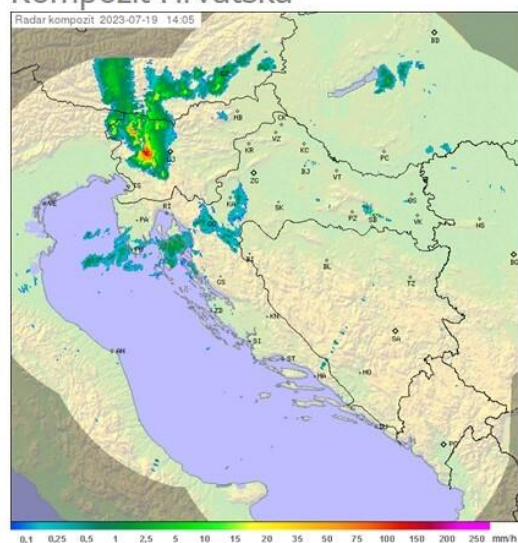
Slovenija, Lisca



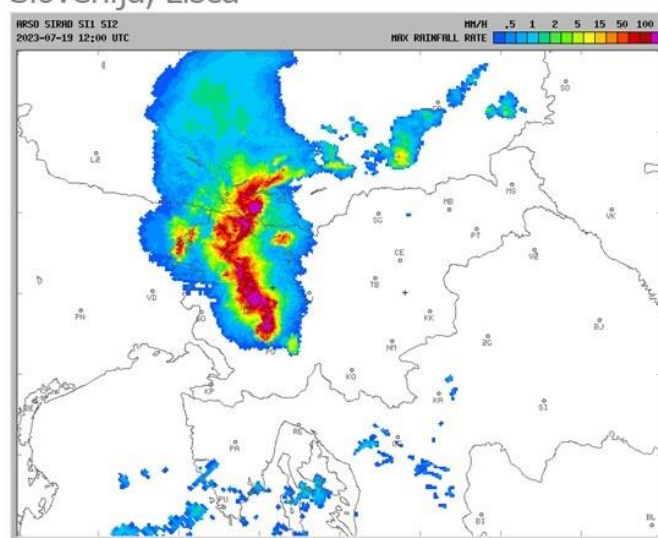
Na kompozitu hrvatskog radara još ništa ne zvoni na uzbunu, no slika slovenskog radara s Lisce govori da bi se situacije mogla zakomplicirati. Na slovenskoj slici jasno se vidi nekoliko „žarišta“.

14:00

Kompozit Hrvatska



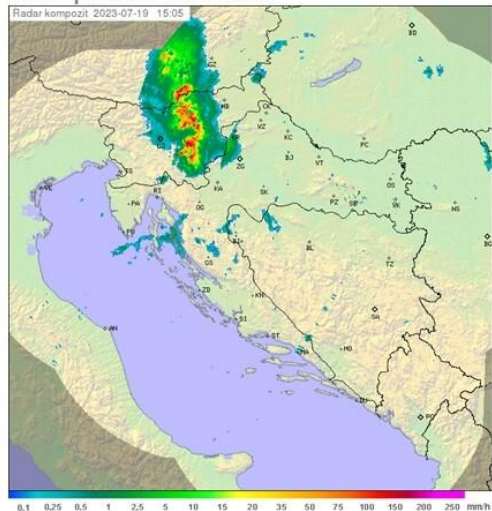
Slovenija, Lisca



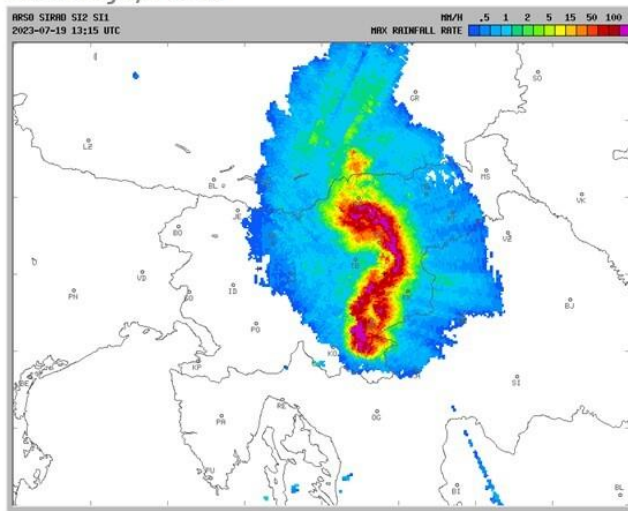
U 14 sati olujni je sustav još daleko za hrvatske radare da bi se vidjeli pravi razmjeri oluje. Zato slika radara Lisca zvoni na uzbunu! Sada se jasno vidi ciklonalna rotacije sustava, sjeverni dio zakreće prema zapadu, a južni prema istoku – meteorološkim rječnikom, formirala se mezociklona, a linija oborina, sada već žestokih pljuskova, ocrta liniju hladne fronte.

15:00

Kompozit Hrvatska



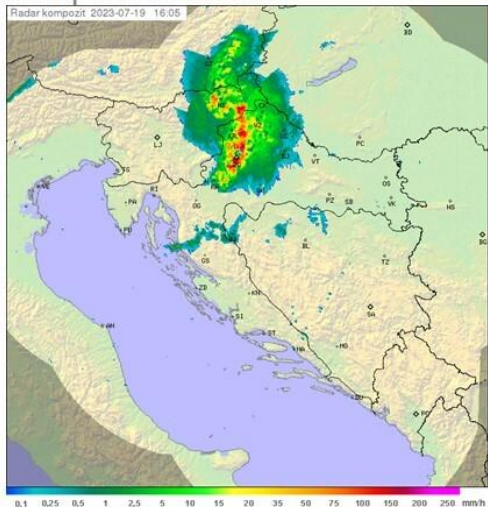
Slovenija, Lisca



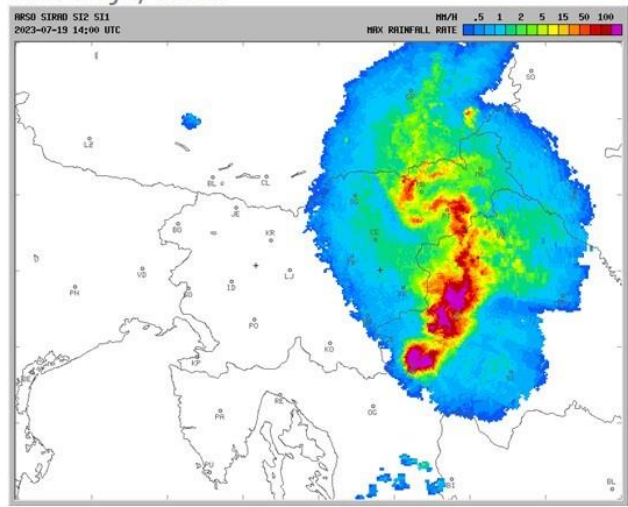
U 15 sati olujni je sustav na granici s Hrvatskom. Sada više nema dvojbe – radi se o žestokoj oluji (Klemp, Joseph B., Dynamics of Tornadic Thunderstorms, 1987.)!

16:00

Kompozit Hrvatska

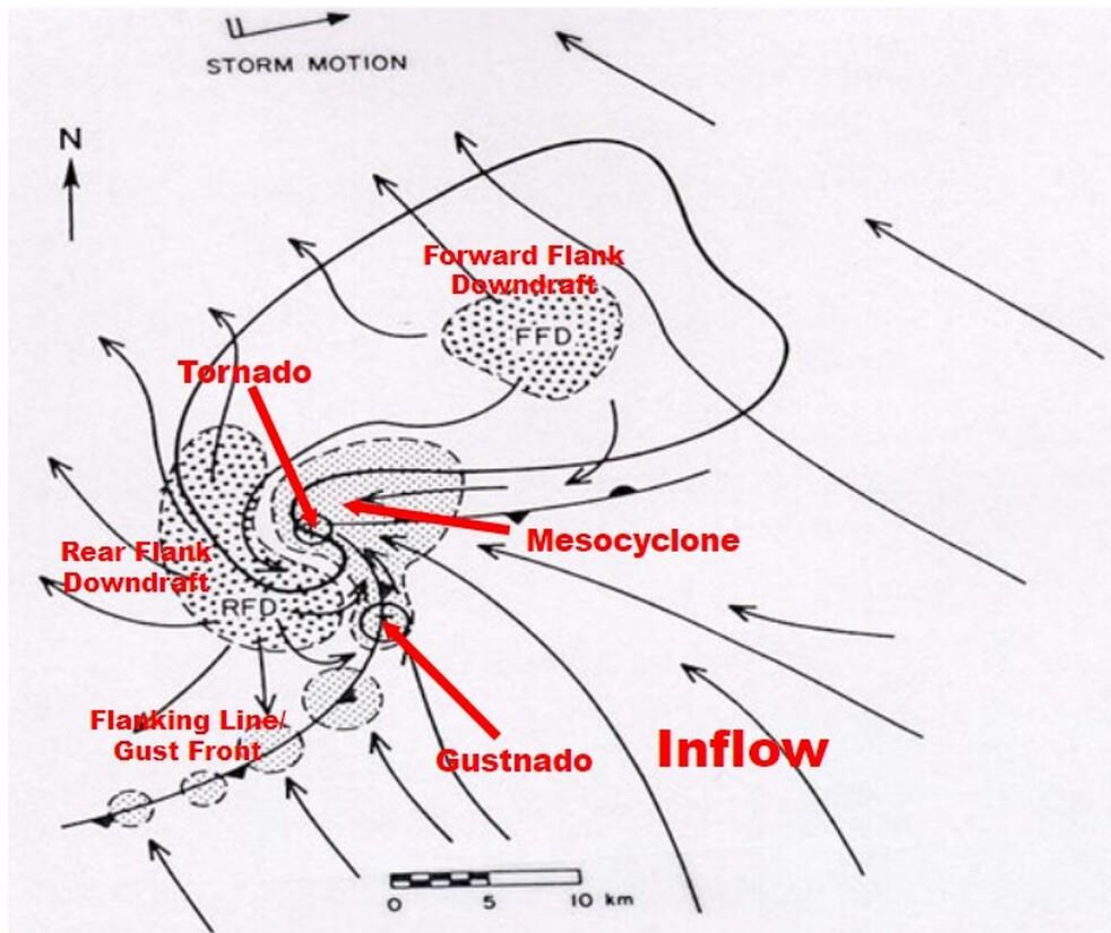


Slovenija, Lisca



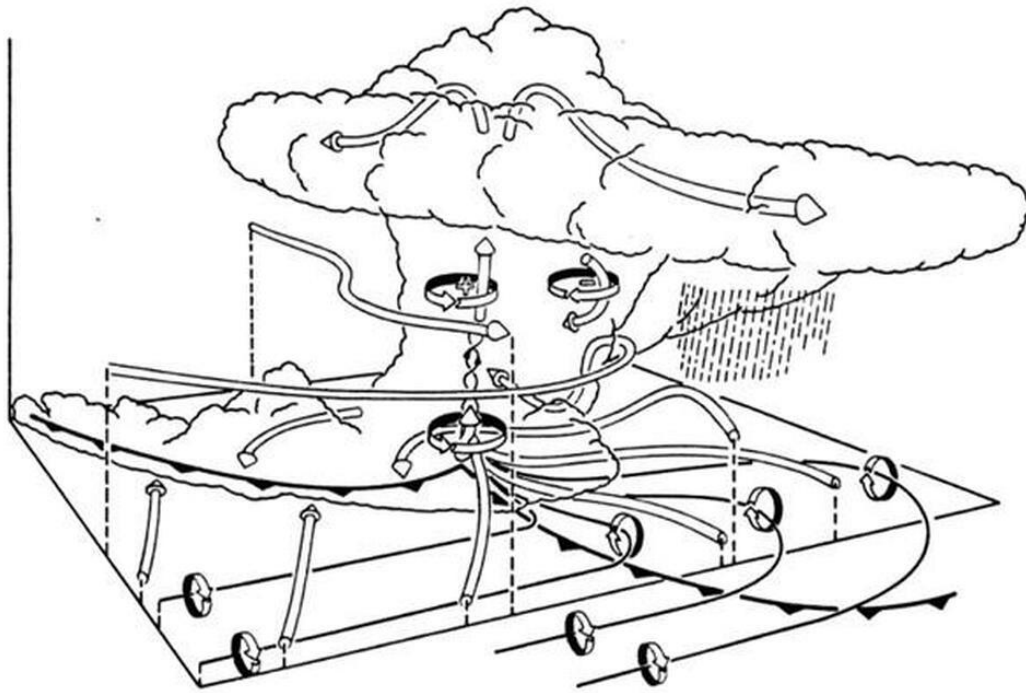
Oko 16 sati u Zagrebu je „Armagedon“! Na slici radara Lisca područja oborina jasno ocrtavaju prednji (gornja ljubičasta mrlja) i stražnji (donje ljubičasta mrlja)

bok oluje! Praznina između je mjesto gdje će se, vrlo vjerojatno, formirati tornado (Klemp, Joseph B., Dynamics of Tornadic Thunderstorms, 1987.; Orf, Leigh et al. Evolution of a Long-track Tornado Within a Simulated Supercell)!



From: Bluestein, *Synoptic-Dynamic Meteorology -- Volume II*

Shematski prikaz prijelaza superstanice u tornadnu fazu. Vidi se „S“ oblik sustava, te hladna fronta na njenom južnom dijelu. Na sjeveroistočnom dijelu je područje usisavanja toplog i vlažnog zraka – goriva koji pokreće superstanicu. Područja označena s FFD i RFD predstavljaju mjesta žestokih oborina.



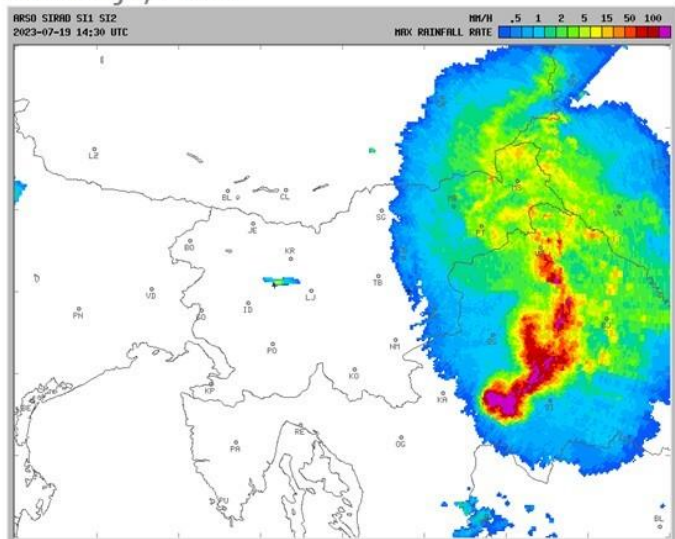
Shematski prikaz strukture toka unutar numerički simulirane superstanice koja se razvija u jednosmjernom smicanju vjetra u vrijeme kada se rotacija na maloj visini ubrzano pojačava, ali prije formiranja zatvorene fronte vjetra prikazane na prethodnoj slici. (Klemp 1987.)

16:30

Kompozit Hrvatska



Slovenija, Lisca



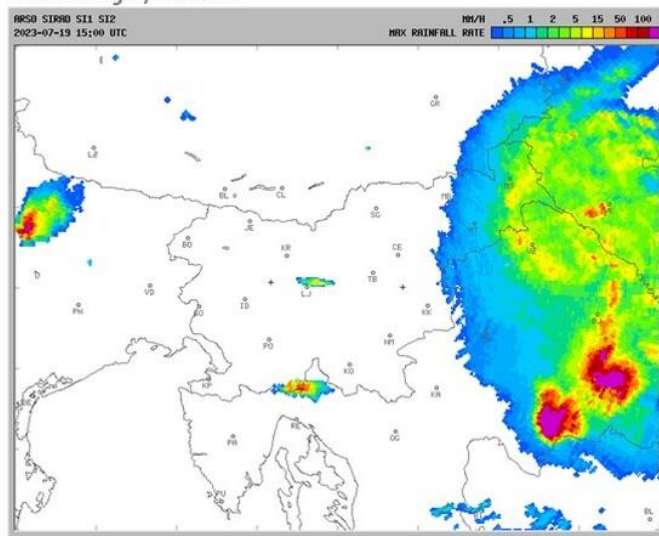
Olujni sustav ostavlja dvoje mrtvih u Zagrebu i materijalnu štetu koja će se zbrajati tjednima. Radar Lisce pokazuje da je prva tornadička faza gotova (Klemp, 1987). Tornado je, stvorivši negativni, obrnuti gradijent tlaka od onoga koji ga je stvorio, izazvao spuštanje zraka, „ubio“ sam sebe. No, oluja nesmiljenom žestinom napreduje na istok.

Oko 17 sati

Kompozit Hrvatska



Slovenija, Lisca



Oko 17 sati kreira se nova tornadička faza. Lijepo se vide lijevi i desni spuštajući bokovi te područje tornadogeneze između njih. Ciklona rotacija sustava je više nego jasno izražena.

Zaključak

Napredak u istraživanju grmljavinskih oluja jasno je dokumentirano da je snažna rotacija unutar superstanica dominantan faktor u oblikovanju vrlo posebnih karakteristika ovih oluja. Ova rotacija je primarno izvedena iz horizontalnog vrtloga ugrađenog u smicanje vjetra iz okoline koje je poneseno u oluju i nagnuto prema okomitoj osi. Jaka rotacija na bokovima srednjeg uzlaznog strujanja potiče cijepanje početne konvektivne ćelije kao i poprečno širenje oluje. Ova rotacija također pridonosi formiranju dugovječne strukture u kojoj padajuće strujanje podupire, umjesto da uništava, kontinuiranu konvekciju. Kako se zrak ohlađen isparavanjem kreće na putanju dotoka oluje, baroklino stvaranje horizontalne vrtložnosti duž granice ovog hladnog zraka uzrokuje intenziviranje rotacije niske razine koja može pokrenuti prijelaz oluje u njenu tornadičku fazu.

Važno pitanje koje ostaje neriješeno je: Kako je tornadička cirkulacija ugrađena u strukturu olujne ljestvice? Sam tornado izgleda gotovo osnosimetrično, dok je struktura oluje u blizini tornada (duž granice između toplog uzlaznog i hladnog silaznog zraka) vrlo asimetrična. **I u numeričkim modelima i u promatranjima, problem je kompliciran zbog razlike od gotovo dva reda veličine u horizontalnoj skali tornada i matične oluje.** Buduća istraživanja s radarima visoke razlučivosti i snažnijim superračunalima nedvojbeno će pridonijeti rješavanju ovog iznimnog pitanja.

Do danas, istraživanje tornadičkih grmljavinskih oluja dovelo je do rafiniranog razumijevanja okolišnih uvjeta koji promiču te oluje i poboljšane sposobnosti identificiranja istaknutih značajki unutar oluje koja se razvija koje ukazuju na veliku vjerojatnost nadolazeće tornadičke aktivnosti. Drugi čimbenici, međutim, kao što su procesi inicijacije oluje i interakcije između oluja i okoliša većeg razmjera, uvelike kompliciraju izgled za predviđanje točnog vremena i lokacije tornada sa značajnim predhodnim vremenom. Bit će potrebna daljnja istraživanja u tim područjima kako bi se značajno poboljšala ova perspektiva. (Klemp 1987.)

RADAR UKRATKO

Radarska **refleksivnost** mjeri učinkovitost objekata pri primanju i vraćanju energije (elektromagnetskih valova).

Korisne informacije: **lokacija oborine, intenzitet oborine, brzina i smjer vjeta, oblik sustava.**

Dvojno polarizirani Doppler radar Vaisala C-band model WSR 300 proizvođača Vaisala OYJ (Finska): transmitira i prima podatke u **horizontalnom i vertikalnom smjeru**, razlikuje **vrste oborine** (kiša, snijeg ili snijeg koji se topi), detektira **tuču** unutar grmljavinske oluje, lakše raspoznaje objekte nepovezane s vremenom.

Manje vrijednosti **dBz-a** znači **slaba oborina**, veće vrijednosti intenzivnija oborina (**> 45 dBz** u principu uzrokovani **grmljavinskim olujama**, **> 60 dBz tuča**)

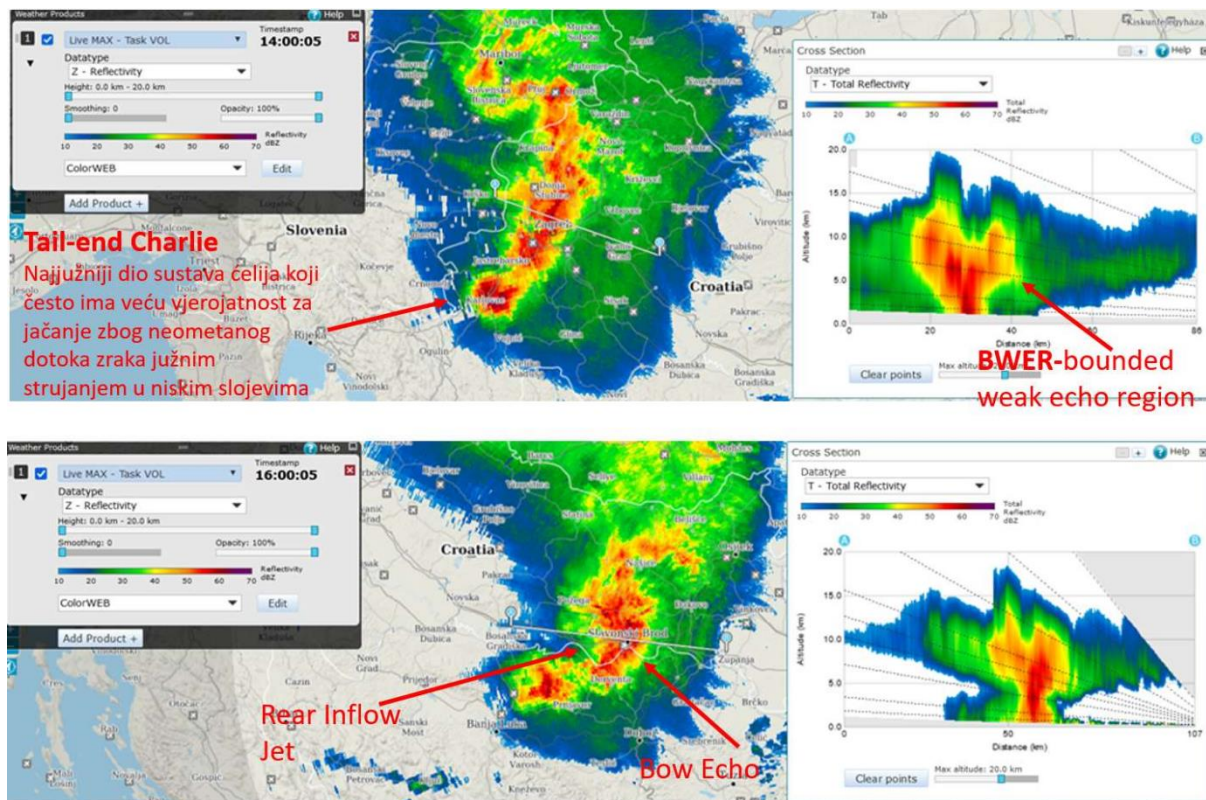
Vertikalni presjeci daju dodatne informacije o razvoju grmljavinskih oluja, **a bez kompletne radarske slike (vertikalni i horizontalni presjek) ne može se ocijeniti da li je oluja superstanična ili ne, jer i drugi tipovi Cumulonimbusa ostavljaju iza sebe relativno velike štete.**

ZNAČI, SAMO KOMPLETNA RADARSKA SLIKA POKAZUJE DA LI JE OLUJA SUPERSTANIČNA ILI NEKOG DRUGOG NAVEDENOG TIP.

Treba napomenuti da su se do 1995. godine radarska mjerenja vršila “ručno” mjereći i zapisivajući pojedine visine kontura reflektivnosti oblaka (45, 55 i 65 dBz) putem radara WSR-74-S, a digitalizacijom se dobila veća kvaliteta ocjene jačine i vrste oluja.

KRATKI PRIRUČNICI ZA PROGNOZU KONVEKCIJE

Vaisala IRIS focus - ima 6 novih radarskih sustava na području Hrvatske



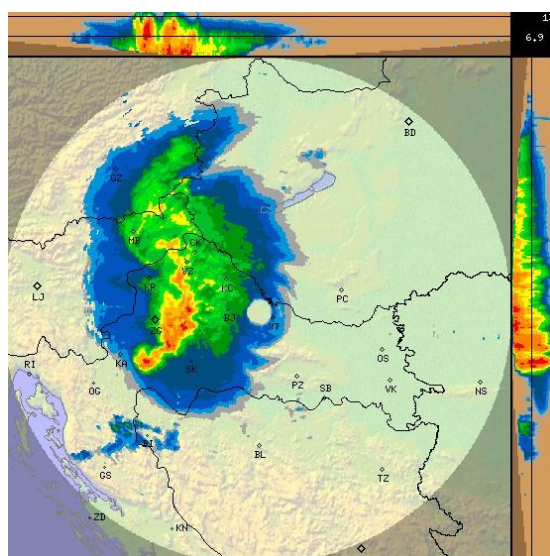
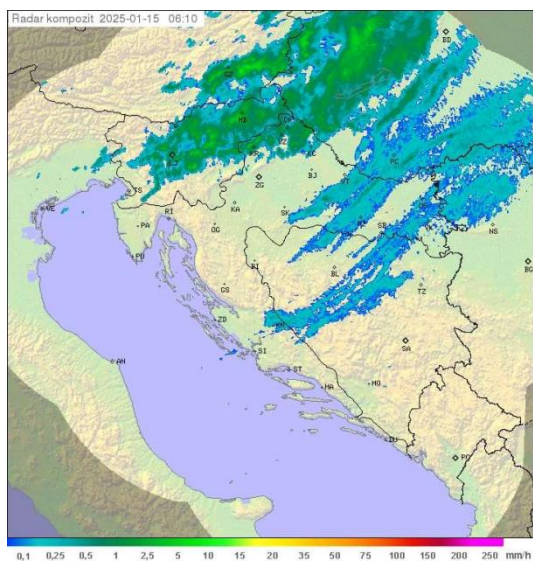
Vaisala IRIS fokus ima mogućnost vertikalnih presjeka, mjerenje udaljenosti, praćenje različitih elemenata na radaru (*Tools*).

Također ima *nowcasting* (vrlo kratkoročna prognoza) opciju i ekstrapolira gibanje oluja u budućnosti nekoliko sati, ali ne koristi fiziku.

Prikazuje uz oborinu, satnu akumulaciju oborine, brzinu i smjer vjeta, smicanje vjeta, maksimum podataka, vizualizaciju munja i zona opasnosti od aktivnosti munja.

Kompozit-pokriva cijelo područje RH, daje informaciju o intenzitetu oborine i maksimalnoj reflektivnosti.

Prikazi pojedinih radara daju precizniji intenzitet i reflektivnost za oluje bliže položaju radara, te njihov vertikalni presjek. Animacija odraza može poslužiti za procjenu advekcije i brzinu, te smjer gibanja sustava.



Vizualizacija DHMZ-a radarskih odraza (svakih 5 minuta)

KARAKTERISTIKE	TUČA	VJETAR	KIŠA	Mezociklonalni TORNADO
CAPE	• "debeli" CAPE iznad nivoa od -10°C: osobito u zoni rasta tuče (-30 do -10°C) • velika tuča: 500–1000 J/kg i više	• CAPE ≥ 500 J/kg • veliki DCAPE > 500 J/kg • *Low CAPE high Shear okolina (uglavnom hladni dio godine)	• tanki CAPE	• veliki SBCAPE > 1000 J/kg • nije izdignuta DMK
Visina baze oblaka	• visoka baza oblaka: LCL: 1000 – 1700 m	• visoka baza oblaka LCL: 750 – 1700 m	• niska baza oblaka: LCL ≤ 1000 m • debeli topli oblak: dubina sloja od LCL-a do nivoa od -10°C: 3-4 km	• niska baza oblaka: LCL ≤ 1000 m
Vertikalno smicanje vjetra	• jako smicanje vjetra: DLS: 10 – 20 m/s i više	• jako smicanje vjetra u nižim slojevima: MLS: 10 – 20 m/s • srednje strujanje okomito na sustav (bow echo ili derecho olujne pruge) • jako srednje strujanje – brzo propagirajući olujni sustavi • DLS isto pogoduje, osobito ako je > 20 m/s	• strujanje paralelno sa sustavom (training ili backbuilding sustavi) • slab srednji vjetar – sporo gibanje sustava, kvazistacionarnost	• ciklonalno zakrivljeni hodograf: • LLS: 8-15 m/s • SRH 0-1 km: 70-100 m^2/s^2
Rasprostranjenost oluja (organizacija)	• superčelija (za tuču ≥ 5 cm) • DLS > 20 m • SRH 0-3 km > 150 m^2/s^2	• velika rasprostranjenost kvazilinearni sustavi – olujne pruge koje poprimaju oblik povijenog luka (bow-echo)	• velika pokrivenost – ovalni višćelijski sustavi (MCS, MCC) • ILI • manji linijski sustavi koji iniciraju nove čelije na istom mjestu (orografska inicijacija) ili se jako sporo gibaju (training ili backbuilding sustavi)	• superčelija • DLS > 20 m • SRH 0-3 km > 150 m^2/s^2
Vertikalni profil	• strmi temperaturni gradijenti: 0-3 km & 850-500 hPa: $> 6.5^{\circ}\text{C}/\text{km}$ • TPW > 20 mm • WBZ: 1500 – 3000 m	• "obrnuto V" ispod visokog LCL-a (suhi malopropad) • strmi temperaturni gradijent 0-3 km: $> 6.5^{\circ}\text{C}/\text{km}$ • suh i dobro izmiješan granični sloj	• mokri profil • TPW > 35 mm	• strmi temperaturni gradijenti

GRMLJAVINSKO NEVRIJEME

KRITERIJ	
Jedinični Cb-ovi: lokalno izraženi pljuskovi s grmljavinom • prostorno rijetki: CIN ≤ 50 J/kg, slab mezoskalni mehanizam podizanja • trajanje: 30 min – 1h • CAPE: 200 – 1000 J/kg • DLS < 10 m/s • hodograf: kratak, nasumično orijentiran, malo do umjereno smicanje (do 10 m/s) Dominantne opasne pojave: • obilna oborina: 20-40 mm/3h • udari vjetra > 17 m/s • moguća pojava sitne tuče (promjer do 2 cm)	
Linijski orijentirane ćelije (<i>squall line</i>) i multićelijski klasteri • prostorno razmjerno česta pojava: CIN 20-50 J/kg, izražen mezoskalni mehanizam podizanja • CAPE: 500 – 1000 J/kg • DLS i MLS: 10 – 20 m/s • hodograf: ravna linija, umjereno do jako smicanje (10 – 20 m/s) Dominantne opasne pojave: • lokalno obilna kiša, urbane i bujične poplave: 60-100 mm/3h ➢ TPW > 35 mm • udari vjetra > 25 m/s ➢ DCAPE > 500 J/kg • tuča (promjer 2 do 5 cm)	Prostorno rijetka pojava superćelije • hodograf: (ciklonalno) zakrivljen, umjereno do jako smicanje • SRH 0-3 km > 150 m²/s²
Superćelije i linijski organizirana konvekcija (<i>bow echo, derecho, train effect</i>) • prostorno česta pojava: CIN 0-20 J/kg, jak mezoskalni mehanizam podizanja • CAPE > 1000 J/kg • DLS: 15 – 30 m/s • SRH 0-3 km > 200 m²/s² • hodograf: dugačak, ravna linija ili (ciklonalno) zakrivljen, jako smicanje (> 20 m/s) Radar: <i>hook echo, BWER</i> Dominantne opasne pojave: • obilna oborina, urbane i bujične poplave: 90-130 mm/3h ➢ TPW > 35 mm ➢ dubina sloja od LCL-a do nivoa od -10 °C: 3-4 km • udari vjetra > 33 m/s ➢ DCAPE > 1000 J/kg • velika tuča (promjer > 5 cm): ➢ većina CAPE-a u rasponu od -30 do -10 °C ➢ WBZ: 1500 – 3000 m • Tornado ➢ SRH 0-1 km: 70-100 m²/s² ; LLS: 8-15 m/s; LCL ≤ 1000 m	

Navedene vrijednosti parametara predstavljaju okvirne pragove. Za prognozu pojedine pojave ne moraju nužno biti zadovoljeni svi kriteriji

Precizna podjela superstanica:

1. Low precipitation (LP superstanica) - malo oborina, ali jake rotacije, na vrlo uskom području mogući veliki komadi tuče (od 200 m do 500 m po širini najčešće). Na radaru su to male jezgrice koje skreću desno ili lijevo, jasno vidljivi wall cloud i sve druge komponente klasične superstanice. Traju od pola sata, najčešće do 2 sata. Većina radara kod nas to ne bi ni nazvalo superstanicom, jer se takva vrsta nije kod nas ni spominjala.

2. Pulsirajuća superstanica - primjer Splitskog nevremena. Razvio se klasični Cumulonimbus kad je došao na smicanje vjetra veće od 25 m/s, visoki rt (CAPE) 2000 J/kg itd....naglo je ojačao i nastala je superstanica. Zbog 2-3 konvektivne jezgre blizu nje, dogodio se poremećaj u strukturi, slabljenje jezgre i rotacije. Superstanica "voli" da je sama, da joj ne smetaju drugi klasični Cumulonimbusi. Tako da je događaj u Splitu bila superstanica koja nije bila dužeg životnog vijeka, zbog spomenutih Cumulonimbusa koje su joj smetale, uzimajući joj potrebnu energiju za njen duži životni vijek.

3. Klasična superstanica - tu je sve jasno i više gore opisano

4. HP superstanica (high-precipitation supercell) - ista ko klasična samo što ima "hrane" u izobilju, velika količina oborina, najduži životni vijek itd.....

Novinari često spominju superstanicu, njima je svaki malo jači višestanični oblak, svaki shelf cloud, roll cloud i slično superstanica. Za štetu od olujnog/orkanskog vjetra, oni kažu tornado je prošao i slične termine.

5. "Superstanica s niskim vrhom" Kod nas se mogu pojaviti u rano proljeće ili jesen. Na Jadranu zna nekad i zimi biti. Ključne su značajke: niska visina oblaka, znatno niže od klasične superstanice, visine samo 5-10 km. Nastaje u atmosferi kad je CAPE ispod 1000 J/kg, ali uz snažno smicanje vjetra veće od 25 m/s.

Skromnog izgleda, većinom proizvode obilniju sitniju tuču, rijetko veću od 4 cm promjera. Pošto se mezociklon nalazi blizu tla također može nastati tornado.

Superstanice moraju imati ove komponente, ako jedne nema, to je klasični Cumulonimbus

1. Mezociklon - snažno rotirajuće uzlazno strujanje zraka, srce superstanice

2. Uzlazni tok (updraft) - nosi vlagu i energiju

3. Silazni tok (downdraft) - hladniji zrak koji se spušta

4. FFD (Forward flank downdraft) - glavni silazni tok s prednje strane oluja, donosi jaku tuču

5. RFD (Rear flank downdraft) - silazni tok sa stražnje strane često povezan s nastankom tornada

6. Wall cloud - snižena baza oblaka ispod mezociklona, često mjesto gdje može nastati tornado

1960, 70, 80, 90-ih godina bile su rjetke pojave superstanica u Hrvatskoj. Prosjek je bio 1-3 godišnje. Nažalost kako je prije bilo možemo zaboraviti, sada je prosjek 3-5 u srednjim godinama vjerojatno i više. Na primjer Talijanima se drastično povećao broj superstanica i broj dana s tučom velikog promjera.

KRATKI OSVRT NA EMISIJU OTVORENO HRT-a OD 8. SRPNJA 2025.

SA TEMOM: “KAKO SE PRIPREMITI NA VREMENSKE EKSTREME”

Dvije zadnje rečenice sve kažu o stupnju znanja o olujama:

”Treba nam vremena, treba nam iskustva i ja vjerujem da ćemo biti sve bolji u predviđanju, čak i ovako čudljivog vremena”, kaže voditeljica Centra za klimatološka istraživanja na PMF-u.

Voditelj emisije završava: **“Do tada očito ne možemo očekivati da će nam sustav porukom unaprijed javiti, da ne izlazimo van kuće dok oluja ne prođe”**. Voditeljica Službe DHMZ-a za vremenske prognoze i upozorenja na opasne vremenske pojave kaže: **“Proces je bio previše brz, da bi se mogao na vrijeme predvidjeti, te da bi se poslalo upozorenje na jaku oluju”**

Atmosferski fizičar i klimatolog **priznaje da obrana od tuče radi u laboratoriju, ali je odvijanje u prirodnom okruženju ”nepoznato”**. On tvrdi da treba “pritisnuti” osiguravajuće zavode da realno isplaćuju nastale štete od oluja, te tvrdi bez argumenata da je srebrni jodid toksičan, jer se pretvara u neke druge spojeve, ali ne kaže koje, dok bivši voditelj (sada u mirovini) službe obrane od tuče u DHMZ-u, **pokazuje primjerom “kako treba kontinuirano pratiti radarsku sliku koja je jedina mjerodavna za davanje takvih upozorenja građanima”**. Gradonačelnik Splita spominje da će se zatražiti proglašenje elementarne nepogode, što je nakon nekoliko dana po medijima odbijeno.

Prvo, klimatologija očito nema problema u prirodi meteorologije koja nikada neće dozvoliti čovjeku da bude bolji u predviđanju čudljivog vremena na vremenski kratkoj skali. Neka se pita djelatnike u obrani od tuče i odjelu daljinskih mjerenja (radarska meteorologija).

Drugo, kome bi sustav trebao porukom javiti da ne izlazi na “kijamet”, nekom čudnom obamrlom biću koje je zaledilo sva ljudska čula, koje ne zna gledati kroz prozor i čeka upute kako da živi i kada da krepa.

Treće, takav je sustav (SRUUK) zamišljen da manipulira masama koje će religiozno vjerovati sustavu poruka uputa, naredbi i zabrane. Tu slobodnog pojedinca više ne smije biti.

To jest, bit će ga sigurno uvijek, jer sam optimist, no okolina slobodnog pojedinca bit će sve opakija po biće slobodne volje.

Kao uvijek dosad, dodajem, jer se slabo šta od seoskih vračeva, derviša, faraona, inkvizicije, čvrste ruke partije, i stranke, i ujka Sama, slabo išta suštinski promijenilo.

A splitska nevera kod normalnih ljudi rješava se uvijek na isti način, pogledaš s terase, pozoveš dječurliju u kuću, namotaš tendu, zatvoriš prozore, škure i vrata da propuh ne porazbija nešto po kući i pričekaš tih dvadesetak minuta da prođe superstanica.

Koja uopće nije bila superstanica, jer da je bila superstanica malo bismo se drukčije razgovarali, jer superstanica uglavnom duže živi, pa bi se imala i ranije radarski zamijetiti, no opet je pitanje da li bi se itko usudio bunovnom jutarnjem Splitu, katastrofičnom porukom dizati tlak. Onda bi superstanica trajala. I konačno prošla. I onda bi stvarno bilo interesantno.

DAKLE, DRAGI NOVINARI PRESTANITE PLAŠITI GRAĐANE SA RAZNIM NEMANIMA I ARMAGEDONIMA, JER OD KAD JE “SVIJETA I VIJEKA” SUPERSTANICE SU POSTOJALE, A TEK KORIŠTENJEM RADARSKIH SUSTAVA KOJI SU U RH UVEDENI DAVNIH OSAMDESETIH GODINA, ZAHVALJUJUĆI “PROGONJENOJ” OBRANI OD TUČE, MOGLA SE DONEKLE SAGLEDATI NJIHOVA STRUKTURA I PONAŠANJE U PROSTORU I VREMENU.

POPIS KORIŠTENIH KRATICA:

CAPE Convective Available Potential Energy (konvektivna raspoloživa potencijalna energija)

CB CAPE Surface-based CAPE (CAPE računat s prizemnom česti)

MU CAPE Most Unstable CAPE (CAPE najnestabilnije česti)

CIN Convection Inhibition (energija inhibicije konvekcije)

DCAPE Dwindraft Convective Potential Energy (potencijalna energija negativnog uzgona koji ima silazna struja zraka)

DLS Deep Layer Shear (smicanje vjetra 0-6 km)

DMK Deep Moist Convection (duboka mokra konvekcija)
LCL Liquid Condensation Level (nivo kondenzacije)
LLS Low Level Shear (smicanje vjetra 0-1 km)
MLS Mid Layer Shear (smicanje vjetra 0-3 km)
MCC Mesoscale Convective Complex (mezoskalni konvektivni kompleks)
MCS Mesoscale Convective System (mezoskalni konvektivni sustav)
SRH Storm Relative Helicity (spiralnost relativnog strujanja u odnosu na oluju)
TPW Total Precipitable Water (ukupna oboriva voda)
WBZ Bulb Zero Temperature (visina nulte izoterme mokrog termometra)

Izvor podataka:

Nebojša Subanović - Analiza superoluje koja je poharala sjeverozapadnu Hrvatsku

Radarske slike Slovenije: [ARSO METEO](#)

Radarske slike kompozita Hrvatske: [DHMZ](#)

Kriteriji za grmljavinsko nevrijeme - revizija 2025. godine, DHMZ

Priručnik za prognozu DMK - beta_verzija 2025. godine, DHMZ

Dinamička meteorologija III - IV skripta - Branko Grisogono, Željko Večenaj, Danijel Belušić i bivši studenti 4. godine predbolonjskog studija - PMF

<https://www.youtube.com/watch?v=H06mYjSpXdE> Orkansko nevrijeme u Splitu 08.07.2025. [Analiza nastanka oluje] **Croatian Storms**

<https://www.youtube.com/live/-OBPuNrt7h8?si=ZtmWzimmJo2JWOGh>

HRT - Otvoreno Kako se pripremiti na vremenske ekstreme? 8.7.2025.

https://youtu.be/M1YHPBAgaw4?si=D9FT_SZYggm136GU

TV -N1- intervju s ravnateljem DHMZ-a

Pripremio: Gerber Zorislav