



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
PRIRODOSLOVNO - MATEMATIČKI FAKULTET
GEOFIZIČKI ODSJEK

DAMIR POČAKAL

ENERGIJA ZRNA TUČE U KONTINENTALNOM DIJELU HRVATSKE

DOKTORSKI RAD

Zagreb, 2012.



UNIVERSITY OF ZAGREB
FACULTY OF SCIENCE
GEOPHYSICAL INSTITUTE

DAMIR POČAKAL

HAILSTONE ENERGY IN THE CONTINENTAL PART OF CROATIA

DOCTORAL THESIS

Zagreb, 2012.



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
PRIRODOSLOVNO - MATEMATIČKI FAKULTET
GEOFIZIČKI ODSJEK

DAMIR POČAKAL

ENERGIJA ZRNA TUČE U KONTINENTALNOM DIJELU HRVATSKE

DOKTORSKI RAD

Mentor: Prof.dr.sc. Branko Grisogono

Zagreb, 2012.

Posebnu zahvalnost dugujem prof. dr. sc. Branku Grisogonu na savjetima, nesebičnoj pomoći, vremenu i uloženom trudu što mi je puno pomoglo u izradi ovog rada. Također, zahvaljujem prof. dr. sc. Zvezdani Bencetić Klaić i dr. sc. Branki Ivančan Picek, članicama komisije, na korisnim komentarima koji su podigli kvalitetu ovog rada.

Zahvaljujem dr. sc. Željku Večenaju na stručnim savjetima te pomoći u razvijanju metoda i izradi programa u Matlabu i Tomislavu Kovačiću na izradi karata prostorne raspoložive konvektivne energije.

Hvala cijeloj mojoj obitelji na stalnoj pomoći i podršci.

SAŽETAK

Tuča je česta pojava u toplom dijelu godine i u mnogim područjima na svijetu nanosi veliku štetu u poljoprivredi, a u urbanim sredinama na pokretnoj i nepokretnoj imovini. Mjerenje i registracija pojave zrna tuče na tlu zbog vremenskih i prostornih varijacija te kratkog trajanja vrlo je složeno. Potreba za točnijim podacima i objektivnom registracijom, tj. za dobivanjem preciznih podataka o fizičkim svojstvima i kinetičkoj energiji tuče potaknula je znanstvenu zajednicu da konstruira i koristi jednostavni mjerni instrument – tučomjer. U radu je prikazan način mjerenja fizičkih parametara zrna tuče pomoću tučomjera, dok je kinetička energija udara zrna tuče izračunata prema metodi Mezeixa i Dorasa (1981). Prikazan je način baždarenja materijala ploče tučomjera, kao i njegovo postavljanje na prostoru kontinentalne Hrvatske. Dodatno je prikazan odnos kinetičke energije i iznosa oštećenja na raznim biljnim kulturama, kao i detaljna analiza tri slučaja tuče na području posebnog poligona.

U kontinentalnom dijelu Hrvatske postavljanje tučomjera na sve glavne meteorološke postaje i postaje sustava obrane od tuče počelo je tijekom sezone 2001. godine. Gusta mreža tučomjera – poligon, postavljena je početkom 2002. godine na području Hrvatskog zagorja. U razdoblju od 2002. do 2009. godine na svim postajama kontinentalnog dijela Hrvatske i poligona skupljeno je 2 276 ploča tučomjera koje su zabilježile tuču. Ovaj broj podataka s tučomjera predstavlja oko 70 % svih registriranih slučajeva tuče na postajama u kontinentalnom dijelu Hrvatske u promatranom periodu. Rezultati analize ploča tučomjera pokazuju da se broj zrna tuče, koji je pao na površinu od 1 m² kretao od 16 do 15 104 zrna sa srednjim promjerom od 8.1 mm i najvećim zabilježenim promjerom od 35.4 mm. Godišnja distribucija promjera zrna tuče pokazuje negativni trend pojave zrna manjeg promjera i pozitivni trend pojave zrna većeg promjera na području kontinentalne Hrvatske.

Izmjerene vrijednosti kinetičke energije imale su vrijednosti između 0.1 i 1 359.6 J m⁻². Srednja kinetička energija za cjelokupno područje kontinentalne Hrvatske u periodu od svibnja do rujna promatranog razdoblja iznosi 36 J m⁻². Mjesec lipanj, uz najveću čestinu pojave tuče, ima i najveće srednje vrijednosti kinetičke energije od 45.7 J m⁻². Analiza iznosa kinetičke energije i stupnja oštećenja raznih biljnih kultura

pokazuje da je u intervalu od 0.1 do 25 J m⁻² zabilježena neznatna ili nikakva šteta na biljkama. Oko 70 % slučajeva tuče u tom intervalu zabilježeno je u razdoblju od 2002. do 2009. godine na području kontinentalne Hrvatske. Rezultati pokazuju da iste vrijednosti kinetičke energije na raznim biljnim kulturama i fenofazama ne daju isti stupanj oštećenja.

Rezultati prostorne analize pokazuju da dio zapadnog i središnji dio Hrvatske imaju najveću čestinu slučajeva tuče većeg i velikog intenziteta, a najveći broj tih slučajeva je na području u blizini planina Ivančice, Medvednice, Bilogore i Kalnika. Dobiveni rezultati mogu se koristiti u daljnjim istraživanjima grmljavinskih oluja, klimatoloških i evaluacijskih studija, a mogu se primijeniti i u provedbi mjera zaštite cjelokupne imovine aktivnim ili pasivnim metodama.

Ključne riječi: zrna tuče, tučomjer, kinetička energija (K.E.), poligon, orografija.

SUMMARY

Hail is a frequent phenomenon in the warm part of the year, and in many areas around the world it causes great damage to agriculture, to both the mobile and the immobile property in cities as well. Measuring and registration of hailstones parameters on the ground is complicated because of their great spatial and temporal variability. The necessity to receive objective and exact hail data on the ground, motivate the scientific community to construct and use a simple measuring device – hailpad. The topic of this dissertation is a description of method for measuring physical parameters of hail stones and for calculating the kinetic energy of hail stones, Mezeix and Doras (1981) method is used. Calibration method for different materials used for hailpads, as well as installation of hailpads in continental part of Croatia is also shown. Relation between kinetic energy and amount of damage on different agriculture plants is also given. Detailed analysis for three hail fall cases on a polygon area is provided.

In order to obtain a more precise and objective hailstone data, hailpads were installed during the season of 2001 on each main meteorological and hail suppression station in the continental part of Croatia. In the year 2002 the location of a dense hailpad network – polygon was determined in the area with the highest average number of days with hail in the continental part of Croatia, called the Croatian Zagorje. During the hail season in the 2002 to 2009 period, 2276 damaged hailpads were collected on all stations in the continental part of Croatia. This number of damaged hailpads represents about 70 % of all observed and reported hail cases on all stations in this area.

The results of hailpad data analysis show that the number of hailstones per square meter was between 16 and 15104, with the average hailstone diameter of 8.1 mm and the maximum recorded hailstone diameter was 35.4 mm. The analysis of relative frequency distribution of hailstone diameter shows that the first four size classes from 5 mm till 15 mm contain about 96 % of all recorded hailstones. Annual distribution for this four size classes shows a negative trend of smaller hailstone occurrence and a positive trend of greater hailstone occurrence in the continental part of Croatia. The measured values of kinetic energy in the 2002-2009 period were between 0.1 and 1359.6 J m⁻² and average value for this time period in the continental part of Croatia was 36 J m⁻². Monthly average values are highest in June (45.7 J m⁻²), while similar values

are measured in July (39.7 J m^{-2}) and August (39.3 J m^{-2}). Having examined these results, it can be concluded that the most frequent and the most intense convective activity occurs in June, when the atmospheric instability is maximized. Analysis of relationship between kinetic energy and the amount of damage on different plants, shows that the kinetic energy in interval of $0.1 - 25 \text{ J m}^{-2}$ creates no or minor damage on different agricultural plants. About 70 % of all hail cases with this intensity are recorded for period 2002-2009 in the continental part of Croatia. The analysis also reveals that the same amount of kinetic energy damages different plants with various intensity.

The results of spatial analysis show that the west and middle part of continental Croatia have the most frequent cases of severe hail, especially in the areas near the mountains Ivančica, Medvednica, Bilogora i Kalnik. These results can be applied in further research of severe thunderstorms, climatology and evaluation studies, in agriculture, and also can be applied for implementation of property protection with passive or active methods.

Key words: hailstones, hailpad, kinetic energy (K.E.), polygon, orography.

POPIS SKRAĆENICA

A - regionalna dimenzionalna konstanta

BRN – Richardsonov integralni (*bulk*) broj

C – regionalna konstanta

c_j - faktor otpora oblika ledenog zrna

CAPE – raspoloživa konvektivna potencijalna energija

CET – centralno Europsko vrijeme

d – promjer zrna tuče

d_m - maksimalni promjer zrna tuče

EOF – empiričke ortogonalne funkcije

g - ubrzanje sile teže

GMP – glavna meteorološka postaja

GP – generatorska postaja

K.E. – kinetička energija

K.E._G – globalna kinetička energija

KVD – kvadrant

L – ekvivalentna visina

LI – indeks podizanja (*lifted index*)

LP – lansirna postaja

LT – oznaka tučomjera

M – masa zrna tuče

M_G - ukupna masa zrna tuče

MER 93S – digitalni radar malog dometa

N_t – ukupni broj zrna tuče (m⁻²)

N₀ – sjecište (*intercept*) linije regresije i osi ordinate

OT – obrana od tuče

PDF - funkcija vjerojatnosti gustoće (*probability density function*)

PPI – horizontalni – prostorni presjek (*plain parallel indicator*)

PRO – promjer (mm)

RC – radarski centar

Re – Reynoldsov broj

RHI – vertikalni presjek (*range height indicator*)

S-band – valna duljina od 10 cm

S - gustoća poligona

S_G – ukupna površina traga tuče

T – tok energije

T_{VP} - virtualna temperatura česti zraka

T_{VE} - virtualna temperatura okolnog zraka

TRJ – trajanje (min.)

U – mjera ukupnog vertikalnog smicanja vjetra

UTC – univerzalno vrijeme, u Hrvatskoj je lokalno vrijeme ljeti UTC+2 h, a zimi UTC+1 h

V_T – granična brzina padanja zrna tuče

WMO – Svjetska meteorološka organizacija

Z_{LFC} - visina razine slobodne konvekcije

Z_{LNB} - visina razine neutralnog uzgona

α – parametar oblika

β – parametar vrijednosti - skalar

λ – nagib (*slope*) linije regresije

ρ_a - gustoća čelika

ρ_L - gustoća leda

ρ_Z - gustoća zraka

η - dinamička viskoznost zraka uz temperaturu od 15⁰ C

SADRŽAJ

1. UVOD	3
2. MJERENJE FIZIČKIH PARAMETARA TUČE	5
2.1. Mjerni instrument – tučomjer	5
2.2. Baždarenje tučomjera	6
2.2.1. Baždarenje tučomjera u Hrvatskoj	9
2.3. Primjeri mreža tučomjera u svijetu	12
2.4. Distribucija promjera zrna tuče	15
2.5. Metoda računanja kinetičke energije	17
2.5.1. Globalna kinetička energija	20
2.6. Međunarodne ljestvice intenziteta padanja tuče	21
2.7. Odnos kinetičke energije i štete na biljnim kulturama	23
2.8. Metode postavljanja tučomjera u prostoru	27
2.9. Postavljanje poligona tučomjera u Hrvatskoj	29
3. BAZA PODATAKA	32
4. REZULTATI	34
4.1. Promjer zrna tuče	34
4.2. Kinetička energija	36
4.3. Trajanje padanja tuče	42
4.4. Broj dana i površina zahvaćena tučom na poligonu	49
4.5. Analize grmljavinskog nevremena i parametara tuče na području poligona	51
4.5.1. Slučaj grmljavinskog nevremena 17. lipnja 2008. godine	54
4.5.2. Slučaj grmljavinskog nevremena 7. srpnja 2008. godine	61
4.5.3. Slučaj grmljavinskog nevremena 14. srpnja 2008. godine	68
4.6. Odnos kinetičke energije i štete na biljnim kulturama	76
5. ZAKLJUČAK	81
6. LITERATURA	83

7. ŽIVOTOPIS.....	89
8. POPIS RADOVA.....	90
9. PRILOZI.....	93
9.1. Naputak o postavljanju i rukovanju s tučomjerom	93
9.2. Gauss-Krüger projekcija.....	95
9.3. Mann-Kendall neparametrijski test za linearni trend.....	96

1. UVOD

Tuča je važan ekonomski problem u većini zemalja gdje u toplom dijelu godine nanosi veliku štetu u poljoprivredi, a u urbanim sredinama na pokretnoj i nepokretnoj imovini. Područja s većom čestinom pojave tuče nalaze se u umjerenim geografskim širinama. Na sjevernoj hemisferi to su područja južne Kanade, SAD-a i sjevernog Meksika. U Europi se to područje proteže od Iberskog poluotoka preko srednje Europe do Kavkaza te u istim geografskim širinama sve do Kine. Hrvatska se također nalazi u tom području te je, naročito u ljetnim mjesecima, izložena čestim pojavama grmljavinskih oluja, posebno u kontinentalnom dijelu između rijeka Save i Drave. Za razvoj konvektivnih oblačnih oluja potrebna su tri osnovna čimbenika: sadržaj vlage u nižim slojevima atmosfere, nestabilnost atmosfere, te utjecaj sinoptičke, mezoskalne ili orografske prisile. Grmljavinska ćelija je osnovna strukturna jedinica konvektivnih oblaka, to je kompaktno područje relativno jakog uzlaznog strujanja koje se kroz određeno vremensko razdoblje širi od nižih na srednje i više slojeve atmosfere. Pomoću nje definiraju se tri osnovna tipa grmljavinskog oblaka, tzv. kumulonimbusa (Cb): jednoćelijski, višećelijski i superćelijski kumulonimbus. Vremenski razvoj tih ćelija odvija se u tri stadija: stadij kumulusa, zreli stadij i stadij raspadanja. Upotrebom satelita i radara vidjelo se da grmljavinske ćelije mogu tvoriti razne oblike, a nazivaju ih mezoskalnim konvektivnim sustavima (MCS) od kojih su najčešći: olujne pruge (eng. *Sqall Lines*; SQL), mezoskalni konvektivni kompleksi (grupe ćelija eliptičnog oblika; MCC) te nakupine ćelija u obliku grozda (*clusters*). Ovisno o tipu i dimenzijama konvektivne ćelije, tijekom njenog razvoja u njoj može nastati tuča.

Tuča je kruta oborina sastavljena od zrna ili komada leda, promjera većeg od 5 mm (WMO, 1992) a nastaje isključivo u Cb-u jakog vertikalnog razvoja. Kvantitativni i kvalitativni opis svih meteoroloških pojava, pa tako i tuče, od osnovnog je značenja za meteorološka i druga istraživanja. Dok je za pojedine meteorološke pojave, (temperatura, smjer i brzina vjetra, tlak zraka, itd.) način mjerenja i bilježenja odavno razvijen, to za pojavu tuče nije slučaj. Mjerenje i registracija pojave zrna tuče na tlu su, zbog vremenskih i prostornih varijacija te kratkog trajanja, vrlo složeni. Dosadašnji podaci, dobiveni iz meteoroloških postaja i iz postaja obrane od tuče u Hrvatskoj, raspolazu samo s podacima o broju dana s tučom u mjesecu/godini te s podacima o mjestu i vremenu pojave tuče, dok se same fizičke karakteristike daju samo opisno – uspoređujući veličinu zrna tuče s dimenzijama drugih poznatih predmeta (npr. grašak, lješnjak, orah, jaje).

Potreba za točnijim podacima i objektivnom registracijom, tj. za dobivanjem preciznih podataka o intenzitetu i fizičkim karakteristikama zrna tuče na tlu, potaknula je znanstvenu zajednicu da razvije odgovarajuće mjerne instrumente. U praksi se vrlo dobrim pokazao jednostavni mjerni instrument pod nazivom tučomjer, (Schleusener i Jennings, 1960). Tako dobiveni podaci omogućili su prvi put određivanje točnih fizičkih parametara zrna tuče. Nekolicina autora u svojim radovima (npr. Changnon, 1970; Svabik, 1989; Fraile i sur., 2003a; Dessens i sur., 2007; Sanchez i sur., 2009; Sioutas i sur., 2009) naglašava važnost mjerenja tuče pomoću tučomjera pri istraživanju grmljavinskih oluja te klimatoloških i evaluacijskih studija. Parametri koji se mogu odrediti pomoću tučomjera su promjer i broj zrna tuče te kinetička energija zrna tuče, koja se smatra osnovnim parametrom (jer je mjera intenziteta tuče) i izravno je povezana sa stupnjem oštećenja raznih biljnih kultura (npr. Dessens i sur., 2007; Sioutas i sur., 2009). U ovom su radu prvi put prikazane fizičke karakteristike i intenzitet (kinetička energija) tuče u kontinentalnom dijelu Hrvatske izmjerene pomoću tučomjera u razdoblju od 2002. do 2009. godine, veza između tih parametara i njihov utjecaj na veličinu štete na raznim biljnim kulturama.

Cilj rada je prikazivanje metode mjerenja točnih fizičkih parametara i kinetičke energije udara zrna tuče, određivanje vremenske i prostorne raspodjele tih parametara na području kontinentalne Hrvatske kao i njihova povezanost sa stupnjem oštećenja raznih biljnih kultura. Rad je motiviran potrebom dobivanja točnih podataka koji se mogu koristiti pri istraživanju grmljavinskih oluja, potrebom baždarenja radara, evaluacije modifikacije vremena, testiranja numeričkih meteoroloških prognostičkih modela, u svrhu procjene štete od tuče u osiguravajućim agencijama, pri izradi pasivnih sredstva zaštite (npr. zaštitna mreža) od mehaničkog djelovanja udara zrna tuče i određivanja područja na kojima je potrebno postavljanje zaštitnih mreža.

Rad je podijeljen u pet poglavlja. Drugo poglavlje daje opis, način baždarenja i postavljanja tučomjera, daje prikaz metoda mjerenja fizičkih parametara tuče, pregled međunarodnih skala intenziteta tuče kao i odnose između kinetičke energije tuče i štete na biljnim kulturama. Treće poglavlje prikazuje način mjerenja i izračunavanja kinetičke energije zrna tuče u Hrvatskoj zajedno sa pripadajućim bazama podataka. Svi dobiveni rezultati i analize parametara tuče u kontinentalnom dijelu Hrvatske prikazani su u četvrtom poglavlju.

2. MJERENJE FIZIČKIH PARAMETARA TUČE

Tuča je kruta oborina sastavljena od zrna ili komada leda, promjera većeg od 5 mm (WMO, 1992) a nastaje isključivo u cumulonimbusima (Cb), grmljavinskim oblacima jakog vertikalnog razvoja. Oni nastaju kao posljedica povoljnih mikrofizičkih (nastanak čestica oborine) i dinamičkih uvjeta (jakog vertikalnog strujanja, turbulencije) unutar i u okolini oblaka. Grmljavinska ćelija je osnovna strukturna jedinica konvektivnih oblaka, ona je kompaktno područje relativno jakog uzlaznog strujanja koje se kroz određeno vremensko razdoblje širi od nižih na srednje i više slojeve atmosfere. Pomoću njih se definiraju tri osnovna tipa Cb-a: jednoćelijski, višećelijski i superćelijski oblak.

Mjerenje i registracija pojave zrna tuče na tlu je zbog vremenskih i prostornih varijacija, te kratkog trajanja vrlo složeno. Da bi se dobili kvantitativni podaci o tuči na tlu, koristi se nekoliko vrsta mjernih instrumenata. Pregled tih instrumenata može se naći u radu Towery i Changnon (1974). Nakon što su Schleusener i Jennings (1960), te Decker i Calvin (1961) postavili tučomjere za mjerenje intenziteta (kinetičke energije) tuče na tlu, 1967. godine uslijedilo je postavljanje gustih mjernih mreža tučomjera u Illinoisu, 1971. u Francuskoj te 1975. godine u Švicarskoj (Palencia i sur., 2009). Kasnije se za potrebe istraživanja tučomjeri postavljaju u Austriji, Italiji, Mađarskoj, Grčkoj, Španjolskoj, Argentini i Kanadi. U Hrvatskoj se 2001. godine postavljaju tučomjeri na području kontinentalnog dijela Hrvatske (Počakal, 2002), a 2007. godine postavljen je tučomjerni poligon u Sloveniji (Pliberšek, 2009).

2.1. Mjerni instrument – tučomjer

Tučomjer se sastoji od stalka i tučomjerne ploče. Na poligonima u drugim zemljama koriste se ploče dimenzija između 25 i 35 cm. Materijal ploče s jedne strane treba biti mekan, da bi zrna tuče udarom u ploču ostavila na njoj trag, a s druge strane treba biti otporan na djelovanje različitih vanjskih utjecaja. Ploča se postavlja horizontalno na stalak postavljen na visini 1 m od tla (sl.1.a). Zbog zaštite od ultraljubičastog zračenja površina gornje ploče premazuje se tankom bijelom bojom. Princip mjerenja veličine zrna tuče temelji se na mjerenju dimenzija i broja otisaka koje zrna ostave nakon udara u ploču (sl.1.b). Na temelju veličine otiska traga određuje se stvarna veličina zrna koja su pala te se izračunava njihova ukupna masa i kinetička energija (K.E. u daljem tekstu).

S obzirom na to da se mogu koristiti ploče od materijala različite tvrdoće i elastičnosti, ploče tučomjera je potrebno baždariti kako bi se usporedbom traga kugle poznatog promjera i traga zrna tuče mogao odrediti stvarni promjer zrna tuče koje je palo na ploču tučomjera (Schleusener i Jennings, 1960; Vento, 1976; Lozovski i Strong, 1978; Schiesser, 1988; Počakal, 1988; Svabik, 1989; Palencia i sur., 2007).

a)



b)



Slika 1. a) Tučomjer (stalak i ploča) i b) Tragovi tuče na ploči

2.2. Baždarenje tučomjera

Cilj baždarenja tučomjera je da se na osnovi poznatih podataka o dimenzijama traga koji ostaje na ploči nakon udara kugle poznatih svojstava (promjer i masa) izmjeri kolike su dimenzije zrna tuče koje su udarile u ploču. Da bi se odredila svojstva zrna tuče, kod izračuna se upotrebljavaju pretpostavke (pojednostavljenja) koja se primjenjuju u međunarodnoj praksi (Schleusener i Jennings, 1960; Vento, 1976; Lozovski i Strong, 1978). Te pretpostavke su:

a) zrna tuče imaju oblik kugle

Već su 1960. godine Schleusener i Jennings pretpostavili da oko 75 % zrna tuče ima oblik kugle, što su kasnija mjerenja i potvrdila (Vento, 1976; Lozovski i Strong, 1978).

b) zrna tuče se prilikom udara ne deformiraju

Odnos mekih i tvrdih zrna jako je promjenjiv i prema različitim autorima, udio mekih zrna varira između 10 % i 50 %: kod Schleusener i Jenningsa 10% (1960); kod Summersa 50% (1968); kod Helda 23% (1973). Ove razlike proizlaze iz različitosti nastanka zrna tuče, uz pretpostavku da je povećanje tvrdoće ovisno o povećanju promjera. Trag mekih ledenih zrna na pločama tučomjera bitno se razlikuje od onih tvrdih (Schleusener i Jennings, 1960; Long, 1978).

c) gustoća zrna je jednaka

Prema različitim autorima gustoća ledenih zrna iznosi između $800 - 910 \text{ kg m}^{-3}$, a pri baždarenju tučomjera najčešće se upotrebljava vrijednost od 900 kg m^{-3} (Schleusener i Jennings, 1960; Vento, 1976; Lozovski i Strong, 1978).

d) promjer traga zrna koje je udarilo na ploču ovisi samo o njegovom promjeru

e) promjer manje osi traga podudara se s promjerom zrna tuče koje je palo na ploču tučomjera

f) zrna padaju s graničnom brzinom V_T

Da bi se odredila brzina padanja zrna tuče (granična brzina V_T), treba uzeti u obzir nekoliko parametara, kao što je srednja gustoća leda te oblik i hrapavost površine zrna tuče. Zrna tuče u blizini površine Zemlje uglavnom padaju brzinom koja je jednaka iznosu granične brzine i ovisi o promjeru zrna (tablica 1.), tj. sila teža i otpor su otprilike jednaki pri njihovom padu. Tako se prilikom udara ledena zrna promjera d u horizontalnom smislu kreću u skladu s brzinom vjetrova, a vertikalna komponenta brzine (V_T) prema Mezeix i Admiratu (1978), iznosi:

$$V_T = \left(\frac{4}{3} \cdot \frac{\rho_L}{\rho_Z} \cdot \frac{gd}{c_j} \right)^{0.5} \quad (1)$$

U toj formuli ρ_L je gustoća leda, ρ_Z gustoća zraka, C_j je faktor otpora oblika ledenog zrna, g je iznos ubrzanja sile teže, a d promjer zrna tuče. Najčešće upotrebljavani parametri su: $\rho_Z = 1.078 \text{ kg m}^{-3}$ (odgovara srednjoj nadmorskoj visini od 700 m i temperaturi od 20°C), $\rho_L = 900 \text{ kg m}^{-3}$ i $g = 9.81 \text{ m s}^{-2}$. Pojedini autori (npr. Vento, 1976; Lozovski i Strong, 1978) vrijednosti faktora otpora C_j uzimaju kao konstantu 0.5 ili 0.6, dok Schleusenner i Jennings (1960) uzimaju faktor C_j u zavisnosti od Reynoldsovog broja. Matson i Huggins (1979) za faktor c_j koriste podatke koje su mjerili u prirodnim uvjetima blizu Zemljine površine

$$c_j = 3.92 Re \quad (2)$$

gdje je $Re = \rho_Z v_T d / \eta$, Reynoldsov broj, η = koeficijent dinamičke viskoznosti fluida koji za zrak kod temperature od 15°C iznosi: $\eta = 1.796 \cdot 10^{-5} \text{ kg (ms)}^{-1}$.

Numerički izraz, uvrštenjem gornjih parametara u jednadžbu (1), daje sljedeći izraz za vertikalnu komponentu brzine padanja zrna tuče:

$$V_T = 13.94 \text{ m}^{0.5} \text{ s}^{-1} d^{0.5} \quad (3)$$

Numeričku vrijednost komponente V_T na visini nivoa mora dobili su Matson i Huggins (1979) na osnovi kinematičkih parametara padanja zrna tuče u prirodnim uvjetima. Oni su snimali zrna tuče u zadnjoj fazi pada i na taj način dobili podatke o obliku, veličini, rotaciji, vertikalnoj komponenti brzine padanja i smjeru pada zrna tuče. Na osnovi 621 izmjenjenog zrna tuče dobili su sljedeći izraz (promjer zrna d uvrštava se u cm) $V_T = 11.45 \text{ m}^{0.5} \text{ s}^{-1} d^{0.5}$, dok korigirani izraz za nadmorsku visinu od 700 m iznosi $V_T = 12.18 \text{ m}^{0.5} \text{ s}^{-1} d^{0.5}$. Mjerenja pokazuju značajnu varijabilnost vertikalne brzine, tako da se za određeni promjer zrna tuče vertikalna brzina može procijeniti s točnošću od $\pm 3 \text{ m s}^{-1}$ (Schiesser, 1988).

Tablica 1. Usporedba konačnih brzina dobivenih izračunom iz (1) od Mezeix i Admirat (1978) i mjerenjem brzine pada zrna tuče (Matson i Huggins, 1979) za različite promjere i nadmorsku visinu od 700 m (Schiesser, 1988)

Promjer	MEZEIX	MATSON	MEZEIX-MATSON
(cm)	(m s ⁻¹)	(m s ⁻¹)	(m s ⁻¹)
0.8	12.5	10.9	1.6
1.0	13.9	12.2	1.7
1.2	15.3	13.3	2.0
1.4	16.5	14.4	2.1
1.6	17.6	15.4	2.2
1.8	18.7	16.3	2.4
2.0	19.7	17.2	2.5
2.2	20.7	18.1	2.6
2.4	21.6	18.9	2.7
2.6	22.5	19.6	2.9
2.8	23.4	20.4	3.0
3.0	24.2	21.1	3.1

Iz tablice 1. može se vidjeti da su izračunate vrijednosti brzine, za različite veličine promjera zrna tuče, veće od izmjerenih i da se te razlike povećavaju rastom promjera zrna tuče.

2.2.1. Baždarenje tučomjera u Hrvatskoj

Baždarenje materijala ploče tučomjera provedeno je bacanjem čeličnih kugli različitog promjera i poznate gustoće, $\rho_a = 7.8 \cdot 10^3 \text{ kg m}^{-3}$, na ploču tučomjera. Da bi čelična kugla promjera d i gustoće ρ_a udarila u ploču energijom jednakom onoj koju ima zrno tuče, potrebno ju je baciti s visine L (ekvivalentna visina; Lozovski i Strong, 1978):

$$L = \frac{V_a^2}{2g} \ln \left[1 - \frac{\rho_L}{\rho_a} \frac{V_T^2}{V_a^2} \right] \quad (4)$$

Kako bi se izračunala ekvivalentna visina, potrebno je prvo pomoću (1) izračunati vertikalne komponente brzine za ledeno zrno (V_T) i čeličnu kuglu (V_a). Faktor otpora za čeličnu kuglu je

$c_a = 0.45$ (Lozovski i Strong, 1978). Veličina promjera upotrebljivanih čeličnih kugli i L prikazani su u tablici 2.

Tablica 2. Ekvivalentna visina za čelične kugle poznatog promjera (Počakal, 1988)
(d je promjer čelične kugle i L je pripadna ekvivalentna visina)

d (mm)	L (m)	d (mm)	L (m)
3.1	0.29	10.4	1.00
5.0	0.47	14.8	1.40
5.9	0.56	15.8	1.50
6.3	0.60	19.0	1.81
7.7	0.73	27.0	2.56
9.3	0.88		

Čelične kugle bačene su s ekvivalentne visine na horizontalno postavljenu ploču pod kutom od 90^0 , te pod kutevima od 30^0 i 45^0 . Za svaki promjer čelične kugle (d u tablici 2.) koje su ispuštene s određenih L pod gore navedenim kutovima izvršeno je najmanje 5 mjerenja dužine traga na ploči tučomjera te je srednja vrijednost tih mjerenja korištena u daljem radu. Kod tragova kugle koje su bačene pod kutom od 30^0 i 45^0 , mjerena je mala i velika os tako dobivenog eliptičnog traga. Kao dodatno mjerenje izvršena je izmjera dubine traga za svaki promjer.

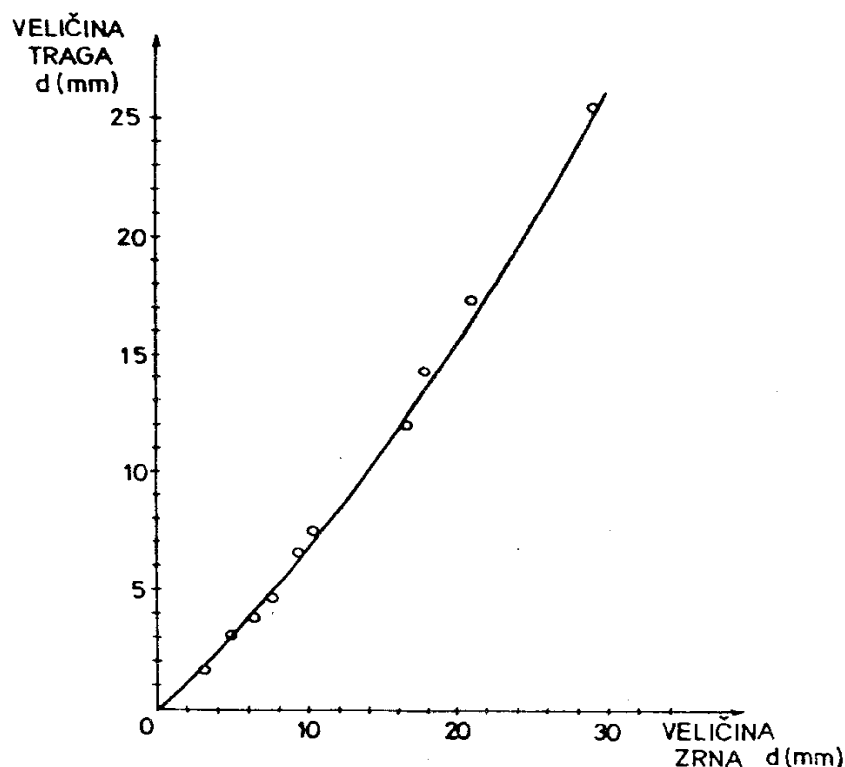
Tijekom mjerenja utvrđeno je da se promjeri tragova kuglica bačenih pod kutom od 90^0 na ploču tučomjera jako malo razlikuju od promjera male osi traga istih kuglica bačenih pod raznim kutovima, što potvrđuje metodu mjerenja male osi traga zrna tuče. Iz odnosa duljine velike i male osi traga može se približno odrediti kut upada zrna tuče. Postupak baždarenja treba se izvršiti za svaku novu seriju ploča te obavezno ukoliko se mijenja materijal ploče. Na temelju podataka promjera čelične kugle i njezinog traga na ploči izrađuje se nomogram (sl. 2.), iz kojeg se na temelju izmjerenog promjera traga tuče određuju stvarni promjeri zrna tuče. Pomoću nomograma koji se dobije na osnovi mjerenja traga čeličnih kugli bačenih sa ekvivalentne visine (tablica 2.), određuje se s točnošću od 0.1 mm odnos veličine traga i zrna tuče. U intervalu veličina dužina traga tuče od 2.5 – 40 mm određuje se stvarna veličina zrna tuče sa točnošću od 0.1 mm. Na primjeru materijala ploče tučomjera koji se sada koristi na postajama u kontinentalnom dijelu Hrvatske, trag tuče od 2.5 mm udarom u ploču ostavi zrno tuče promjera 5 mm, a zrnu tuče promjera 14 mm odgovara širina traga male osi od 10 mm.

Svi dobiveni podaci (broj zrna tuče, promjer zrna tuče i dužina padanja tuče) uključuju se u odgovarajući računalni program koji izračunava, masu, K.E. i tok energije udara zrna tuče.

Iz jedne ploče tučomjera dobiju se sljedeći podaci:

1. datum
2. oznaka (broj) tučomjera
3. vrijeme početka padanja tuče
4. trajanje dužine padanja tuče
5. maksimalni promjer zrna
6. broj zrna za svaki interval veličine d (mm), 14 klasa: (5.0-7.5; 7.6-10.0; 10.1-12.5; 12.6-15.0; 15.1-17.5; 17.6-20.0; 20.1-22.5; 22.6-25.0; 25.1-27.5; 27.6-30.0; 30.1-32.5; 32.6-35.0; 35.1-37.5; 37.6-40.0)

Podatke navedene pod rednim brojevima od 1. do 4. upisuje poslužitelj tučomjera na poledini mjerne ploče.



Slika 2. Nomogram za određivanje promjera zrna tuče (Počakal, 1988)

2.3. Primjeri mreže tučomjera u svijetu

Većina zemalja u kojima je pojava jakih grmljavinskih oluja s tučom česta pojava provodile su ili još provode različita znanstvena istraživanja i evaluacijske studije karakteristika tuče koja se temelje na podacima dobivenim s postavljene mreže tučomjera. Ovdje su navedeni osnovni podaci za većinu mreža tučomjera u svijetu.

U Španjolskoj je na području Zaragoze 2003. godine na površini od 2500 km² postavljeno 100 tučomjera unutar mreže 5 km x 5 km (Sanchez i sur., 2009). Na području Lleida, također u Španjolskoj, 2000. godine na poligonu površine 2800 km² postavljena su 174 tučomjera unutar mreže 4 km x 4 km (Sanchez i sur., 2009).

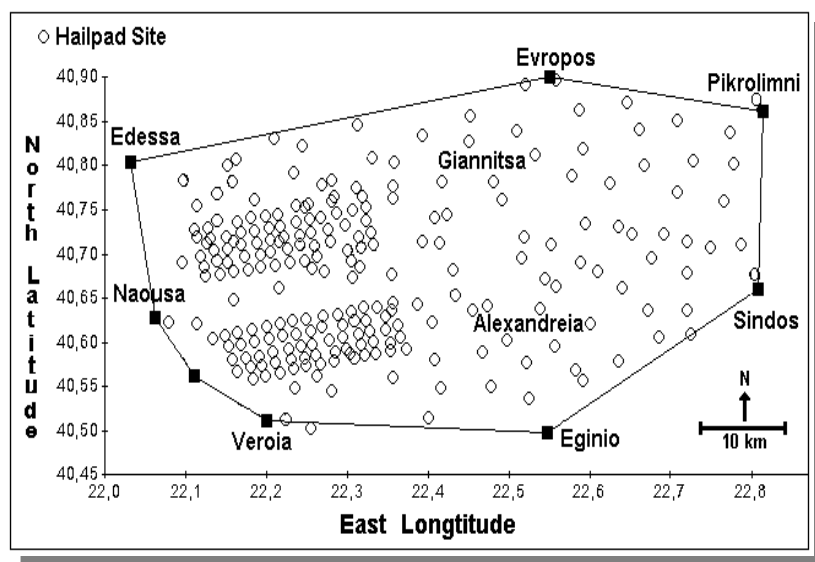
U Argentini je 2007. godine na tri poligona ukupne površine od 10000 km² postavljeno 400 tučomjera (mreža 5 km x 5 km). Unutar poligona na području s najvećom pojavom grmljavinskih oluja postavljena je gušća mreža tučomjera dimenzija 2.5 km x 2.5 km (Sanchez i sur., 2009).

U Švicarskoj je od 1976. do 1983. godine, za potrebe eksperimenta „Grossversuch IV“, na površini od 1 340 km², postavljeno 335 tučomjera, tako da na 4 km² dolazi 1 tučomjer (Schiesser, 1988).

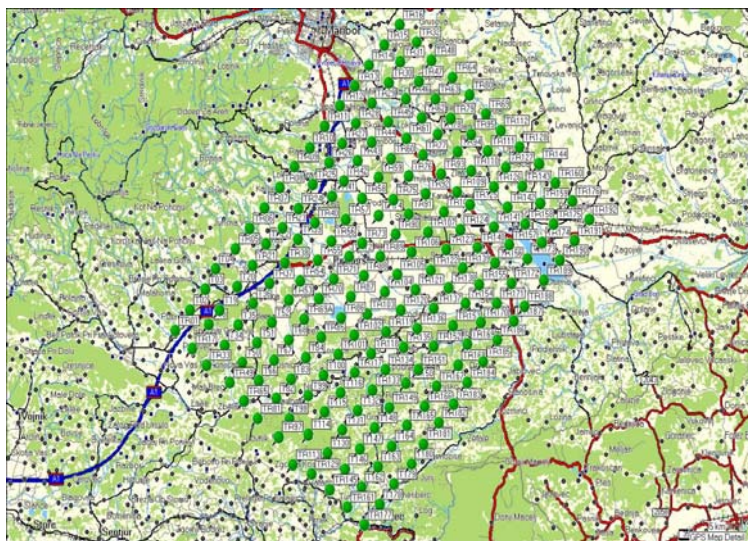
U Grčkoj je 1984. godine, u sklopu programa GNHSP (*Greek National Hail Suppression Program*), na površini od oko 2 000 km² postavljeno 130 tučomjera (sl. 3.) s prosječnom međusobnom udaljenošću od 4 km (Rudolf i sur., 1994).

U Austriji je od 1981. do 2007. godine na dva poligona ukupne veličine 1 200 km² (500 km² u Donjoj Austriji i 700 km² u Štajerskoj) postavljeno ukupno 290 tučomjera (Svabik, 1989).

U Hrvatskoj je od 2001. godine do danas na površini od 26 000 km² postavljeno 730 tučomjera (Počakal i sur., 2009).

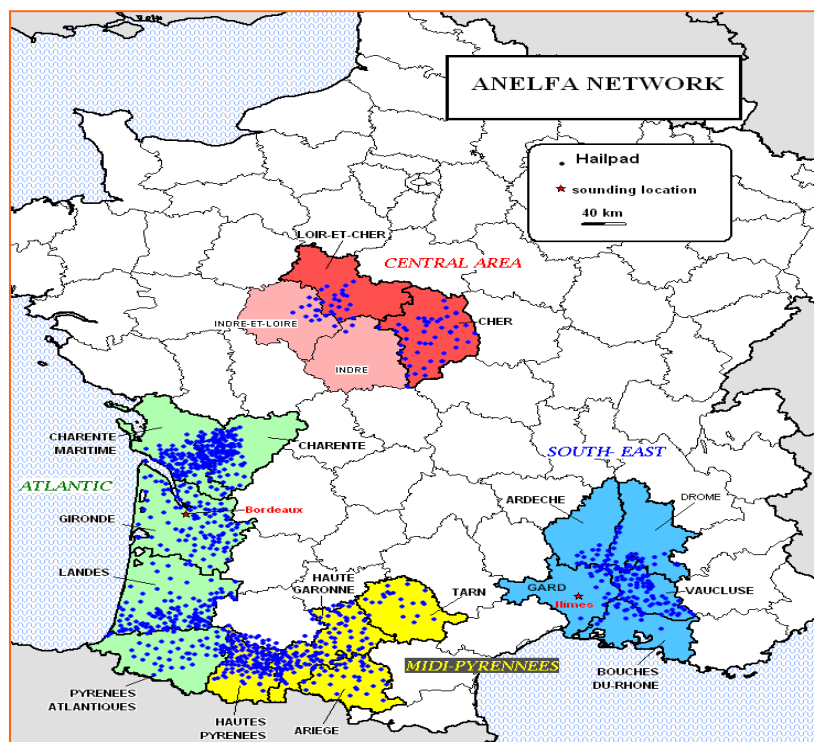


Slika 3. Poligon tučomjera u Grčkoj (Rudolf i sur., 1994)



Slika 4. Poligon tučomjera u Sloveniji (Pliberšek, 2009.)

U Sloveniji je 2007. godine na površini od 600 km^2 postavljeno je 166 tučomjera (Pliberšek, 2009; sl. 4.).



Slika 5. Mreža tučomjera u Francuskoj (Dessens i sur., 2007)

U Francuskoj je od 1971. godine do danas u mreži tučomjera veličine 55 000 km² (sl. 5.) postavljeno 1100 tučomjera (Dessens i sur., 2007).

2.4. Distribucija promjera zrna tuče

Distribucija veličine promjera zrna tuče (histogram) je integralni dio mjerenja ukupnih fizičkih parametara tuče na mjernim poligonima u svijetu. Spektar zrna tuče je važan dio mnogih istraživačkih programa (npr. Mezeix i Doras, 1981; Giaotti i sur., 2001; Dessens i sur., 2007). On daje korisnu informaciju o regionalnoj klimatologiji padanja tuče i o karakteristikama zrna tuče, čime se povećava i naše znanje o strukturi i mehanizmu procesa nastanka zrna tuče u grmljavinskim oblacima. U međunarodnoj praksi često se koristi pretpostavka da kišne kapi slijede eksponencijalnu distribuciju uzimajući u obzir njihovu veličinu (Marshall i Palmer, 1948). Tu su pretpostavku uspješno proširili na istraživanje parametara tuče Crow i sur. (1979) i Mezeix (1990). Neki autori (npr. Ulbrich, 1983; Wong i sur., 1988) predložili su korištenje gama-distribucije, poseban slučaj eksponencijalne distribucije. U ovom radu korištene su obje distribucije te je izvršena njihova usporedba, dobivena pri analizi podataka veličina zrna tuče izmjerenih na području kontinentalne Hrvatske. Za analizu distribucije veličine zrna tuče korištene su dvije funkcije vjerojatnosti gustoće (*probability density function* - *PDF*). Jedna je eksponencijalna:

$$f_e(x) = \lambda \exp(-\lambda x), \quad (5)$$

gdje je λ (mm^{-1}) nagib (*slope*) linije regresije, a druga je gama funkcija:

$$f_g(x) = \beta^a x^{a-1} \exp(-\beta x) / \Gamma(a), \quad (6)$$

gdje je α je parametar oblika, a β je parametar vrijednosti, a $\Gamma(a)$ je gama ili Eulerova funkcija faktoriijela definirana kao (npr. Fraile i sur., 1999):

$$\Gamma(a) = \int_0^\infty t^{a-1} \exp(-t) dt. \quad (7)$$

Za obje funkcije ulazna varjabla definirana je kao $x = x' - 5$ mm (x' je izmjerena veličina svakog zrna tuče), jer se samo kruta oborina promjera većeg od 5 mm definira kao tuča (WMO, 1992). Očekivani broj zrna tuče ($n_{1/2}$), čije se veličine nalaze između x_1 i x_2 iznosi:

$$n_{1/2} = N \int_{x_1}^{x_2} f(x) dx \quad (8)$$

gdje je N ukupni broj zrna tuče. Normalizirana gornja jednačba važi podjednako za $f_e(x)$ i $f_g(x)$ umjesto $f(x)$. Važno je napomenuti da eksponencijalna PDF nije funkcija pogodna za prilagođavanje (*fit*) promjera zrna tuče (klasificiranih u intervalu veličine d). Parametar λ funkcije vjerojatnosti gustoće (PDF) isti je eksponent (često nazvan i parametar nagiba ili kosine). Jednačba (8) se može izraziti i kao (npr. Fraile i sur., 1999).

$$N(x) = N_0 \exp(-\lambda x) \quad (9)$$

Gdje je N_0 parametar sjecišta (*intercept*) i proporcionalan je ukupnom broju zrna tuče N i izrazu $1 - \exp(-\lambda x)$.

Uvrštavanjem veličine intervala promjera zrna d umjesto x , u (9), ova dobiva sljedeći oblik (npr. Crow i sur., 1979; Cheng i sur., 1985; Sanchez i sur., 2009):

$$N(d) = N_0 \exp(-\lambda d) \quad ; \quad 0,5 \text{ cm} \leq d \leq d_m, \quad (10)$$

gdje je $N(d)$ ($\text{m}^{-2} \text{cm}^{-1}$) broj zrna tuče po jedinici površine za svaki interval promjera zrna tuče izražen u cm (0.5-0.75; 0.76-40.0 ... $d_i - d_m$), dok je d_m maksimalni promjer zrna tuče, λ (mm^{-1}) nagib linije regresije i N_0 ($\text{mm}^{-1} \text{m}^{-3}$) sjecište linije regresije i osi ordinate. Taj parametar je funkcija uzete visine praga, tako da su rezultati različiti, ovisno o tome uzimamo li 5, 6, 7 mm ili veće promjere zrna tuče. Prema Ulbrichu (1983), ta distribucija je okrnjena kod maksimalnog promjera. Dennis i Musil (1973) pripisuju to fizikalnim razlozima jer maksimalni promjer zrna korelira s maksimalnom vertikalnom strujom (npr. Nelson, 1983). Treba se podsjetiti da je eksponencijalna funkcija monotono silazna funkcija kojoj je brzina padanja zadana sa λ . Gama funkcija je funkcija zvonolikog oblika koja ovisi o dva parametra (parametar oblika α i veličine β) s maksimumom kod $x = (\alpha-1)/\beta$ ako je $\alpha > 1$. U slučaju da je $\alpha = 1$, gama funkcija prelazi u eksponencijalnu funkciju. Da bi mogli izračunati parametre eksponencijalne funkcije, Cheng i English su 1983. godine linearizirali funkciju distribucije (10) uvođenjem logaritma i prilagodili je koristeći metodu najmanjih kvadrata. Na taj način je eksponencijalna funkcija linearizirana kao:

$$\ln N(d) = \ln N_0 - \lambda d \quad (11)$$

Različite metode prilagodbe mogu se koristiti za izračunavanje parametara funkcija (5) i (6). Prilagodba podataka parametara tuče izmjerenih pomoću tučomjera u kontinentalnom dijelu Hrvatske rađena je pomoću programa „Matlab“ metodom najmanje sume kvadrata.

2.5. Metode računanja kinetičke energije

Iz izmjerenih podataka broja i promjera zrna zabilježenih na jednoj ploči tučomjera izračunavaju se sljedeći parametri:

- | | |
|---|---------------------------------|
| 1. ukupna masa po jedinici površine | $M \text{ (g m}^{-2}\text{)}$ |
| 2. kinetička energija po jedinici površine | $\text{K.E. (J m}^{-2}\text{)}$ |
| 3. gustoća toka energije po jedinici površine | $T \text{ (mW m}^{-2}\text{)}$ |

Vrijednosti za masu dobivene su iz sljedećih izraza za površinsku koncentraciju mase

$$M = \sum n_i \rho_L \frac{\pi}{6} d_i^3 \quad (12)$$

u čemu je $n_i \text{ (m}^{-2}\text{)}$ broj zrna tuče promjera $d \text{ (mm)}$ i ρ_L je gustoća leda,

$$\text{gdje je} \quad d_i^3 = \int_{d_i}^{d_{i+1}} \left[\frac{x^3}{(d_{i+1} - d_i)} \right] dx \quad (13)$$

(d_i, d_{i+1}) su promjeri zrna tuče za svaki interval klase.

K.E. računamo prema Meziexu i Dorasu (1981). Iznos kinetičke energije (K.E.) po jedinici površine u jednoj točki računa se kao:

$$K.E. = 4.58 \cdot 10^{-6} \sum_{i=1}^n n_i \cdot d_i^4 \quad [J m^{-2}] \quad (14)$$

Formula (14) može se pojednostavljeno pisati (Svabik, 1989) kao:

$$K.E. = A \cdot 10^{-6} \cdot d^4 \quad [J m^{-2}] \quad (15)$$

gdje je d promjer zrna (mm), a A je regionalna dimenzionalna konstanta koja ovisi o prosječnoj lokalnoj nadmorskoj visini i temperaturi. U slučaju donje Austrije, za nadmorsku visinu od 350 m i prosječnu temperaturu zraka od 20^0 C, vrijedi $A = 4.30$. Za područje Štajerske, na 400 m nadmorske visine i 19^0 C, vrijedi $A = 4.33$ (Mezeix i Admirat, 1978). Sve vrijednosti K.E., koje se uobičajeno koriste, odnose se samo na vertikalnu komponentu brzine padanja zrna tuče.

Za izračunavanje K.E. (14) za područje kontinentalne Hrvatske u ovom radu izrađen je računalni program (fortran) koji uzima konstantu izračunatu za nadmorsku visinu od 200 m i prosječnu temperaturu od 20^0 C, a ona iznosi $A = 4.28$. Iz izraza (14) može se izračunati K.E. za zrno tuče određenog promjera. Zrno tuče promjera 5 mm ima K.E. od $0.003 J m^{-2}$, zrno promjera 10 mm ima K.E. od $0.04 J m^{-2}$, a od 20 mm ima $0.73 J m^{-2}$. Iz ovog primjera vidi se da povećanje promjera za 5 mm, u rasponu promjera (od 5 do 10 mm) povećava energiju za oko 10 puta. Povećanje promjera za 15 mm (u rasponu promjera od 5 do 20 mm) povećava K.E. udara zrna tuče oko 300 puta. Tablica 3. prikazuje iznos K.E. za pojedine veličine promjera zrna tuče. Na desnoj strani tablice 3. prikazano je za koliko se postotaka K.E. promijenila smanjenjem promjera zrna u odnosu na energiju koju imaju zrna tuče promjera 10, 20 i 40 mm. Radi boljeg pregleda iznosa smanjenja postotnog udjela K.E., vrijednosti su prikazane u tri odvojena stupca.

Tablica 3. Odnos promjera zrna tuče i pripadne kinetičke energije
A(%) – udio K.E. manjih promjera zrna uspoređen s K.E. zrna tuče od 10 mm; B(%) - udio K.E. manjih promjera zrna uspoređen s K.E. zrna tuče od 20 mm; C(%) - udio K.E. manjih promjera zrna uspoređen s K.E. zrna tuče od 40 mm

d (mm)	K.E. (J m^{-2})	A(%)	B(%)	C(%)
5	0.003	7		
8	0.02	50		
10	0.04	100	5	
15	0.23		32	
20	0.73		100	6
25	1.8			15
30	3.7			32
35	6.8			58
40	11.7			100

Iz tablice 3. može se vidjeti da se smanjenjem promjera zrna tuče za 2 mm (u rasponu promjera od 10 na 8 mm) iznos K.E. se prepolovi, a smanjenje od 5 mm daje samo 7 % energije od ukupne K.E. udara koju ima zrno tuče od 10 mm. Slično smanjenje energije na iznos od 6% može se dobiti smanjenjem promjera zrna tuče od 40 na 20 mm.

2.5.1. Globalna kinetička energija

Globalna (ukupna) kinetička energija (K.E.G) traga tuče izmjerena pomoću mreže tučomjera (poligon) izračunava se zbrajanjem vrijednosti kinetičke energije (K.E.) s brojem pogođenih ploča (P) i pomnožena s površinom (S) gustoće poligona, koja iznosi 4 km^2 u slučaju poligona sa pravilnom mrežem tučomjera (2 km x 2 km; Meziex i Doras, 1981).

$$K. E.G = S \sum_{j=1}^P K. E. \quad [10^6 \text{ J}] \quad (16)$$

U analizama se još mogu koristiti maksimalne vrijednosti promjera i broja zrna u jednoj točki (d_m , N_m), za jedan trag tuče te ukupna masa M_G i ukupni broj zrna N_G . Gore navedeni parametri precizno opisuju sve karakteristike tuče na određenoj lokaciji. Dobiveni podaci spremaju se u bazu podataka (tablica 8.).

2.6. Međunarodne ljestvice intenziteta padanja tuče

Međunarodne ljestvice intenziteta oštećenja prouzrokovanih geofizičkim pojavama pogodan su alat za izradu kratke informacije o intenzitetu pojedinačnog događaja uz mogućnost usporedbe sa sličnim događajima u drugim zemljama. Ljestvice tuče ponekad se koriste na određenim područjima da opišu intenzitet padanja tuče. Prva ljestvica intenziteta tuče (H-ljestvica) razvijena je u Velikoj Britaniji (Webb i sur., 1986) te je revidirana 2005. godine (Sioutas i sur., 2009). Ova ljestvica (Torro, *Tornado and Storm Research Organization*) rađena je na osnovi karakterističnih šteta u Velikoj Britaniji. Ljestvica se proteže od H0 do H10, dok su povećanja intenziteta ili potencijalne štete vezani za veličinu zrna tuče (distribucija i maksimalni promjer), strukturom leda, ukupnim brojem zrna, konačnom brzinom padanja, brzinom gibanja oluje i snagom pratećeg vjetrova (tablica 5.). Svaki razred se odnosi na karakteristične štete, ali bi ljestvice trebale biti neznatno modificirane za upotrebu u drugim zemljama zbog prikaza razlika u materijalu i vrsti građevina (Sioutas i sur., 2009).

Dessens i suradnici su 2007. godine, koristeći podatke s tučomjera u Francuskoj u razdoblju od 1972. do 1988. godine, razvili Anelfa ljestvicu (A-ljestvica) intenziteta padanja tuče namijenjenu javnoj upotrebi definirajući u njoj šest razreda, A0 do A5. Ta empirička ljestvica bazira se na intenzitetu šteta na biljnim kulturama. Nedavno su Moisselin i Guillaude (2004) predložili GSC ljestvicu od 6 razreda, sličnu Fujita i Saffir-Simpsonovoj ljestvici za tornada (Fujita, 1971). GSC ljestvica je pogodna za dvostranu upotrebu, kako za meteorologe tako i za javnost. Usporedba svih triju ljestvica dana je u tablici 4. Razlika između Anelfa i

Tablica 4. Međunarodne ljestvice intenziteta padanja tuče

Torro	H0	H1	H2	H3	H4-H5	H6-H10
Anelfa	A0	A1	A2	A3	A4	A5
GSC	1	2	3	4	5	6

Torro ljestvice, kod kojih se intenzitet tuče odnosi na jednu točku (*point hailfall*), je u tome što Torro-ljestvica uzima u obzir i brzinu vjetrova. U praksi se te tri ljestvice odnose na određenu lokaciju, tj. na krug radijusa od nekoliko desetaka metara. GSC ljestvica temelji se na dva parametra, najvećem promjeru zrna i maksimalnoj šteti, a koristi se za ekonomske procjene u Francuskoj. Radi lakše usporedbe sličnih analiza u drugim zemljama, Torro

Tablica 5. Cjelokupna Torro – međunarodna ljestvica intenziteta padanja tuče (Webb i sur., 1986, Sioutas i sur., 2009). Promjeri zrna tuče označeni crvenom bojom su karakteristične maksimalne veličine za određenu klasu

	KATEGORIJA INTENZITETA	PROMJER ZRNA TUČE (mm)	KINETIČKA ENERGIJA J m^{-2}	KARAKTERISTIČNE ŠTETE
H0	tvrdi zrna	5 -7	0-20	nema vidljive štete
H1	moguća šteta	5-15	20-100	mala šteta na biljnim kulturama
H2	značajna šteta	10-20	100-300	značajna šteta na voću, poljop. kulturama i vegetaciji
H3	velika šteta	20-30	300-500	velika šteta na vegetaciji, šteta na staklu, plastici, boji i drvu
H4	velika šteta	25-40	500-800	velika šteta na staklu i karoseriji vozila
H5	razarajuća šteta	30-50	> 800	potpuno uništenje staklenih površina, štete na krovovima i mogućnost ranjavanja
H6	razarajuća šteta	40-60		udubljenja na karoserijama vozila i oštećenja zidova
H7	razarajuća šteta	50-75		velike štete na krovovima, mogućnost ozbiljnog ranjavanja
H8	razarajuća šteta	60-90		jako velike štete na tijelu aviona
H9	super oluja	75-100		ekstremne strukturalne štete, rizik od fatalnih ozljeda za osobe na otvorenom prostoru
H10	super oluja	> 100		--/--

ljestvica (Webb i sur. 1986; Sioutas i sur., 2009) je korištena za prikaz distribucije K.E. izmjerene na području kontinentalne Hrvatske i poligona u razdoblju od 2002. do 2009. godine.

Prema objavljenim rezultatima najveća dosad izmjerena K.E. od $2\,588.3 \text{ J m}^{-2}$ zabilježena je u Argentini (Mendoza), s maksimalnim promjerom zrna tuče od 49.5 mm (Gil-Robles i sur., 2009). Po intenzitetu ovaj slučaj tuče odgovarao bi intenzitetu H6 po Torro ljestvici. Područje Mendoze najvjerojatnije je područje s najvećom frekvencijom i

intenzitetom tuče na svijetu. Zrna tuče veličine loptice za golf dosta su česta pojava, a nije rijetka i pojava tuče veličine loptice za tenis (Sanchez, 2004). U Europi su zabilježena dva slučaja tuče s vrlo velikim iznosima K.E., oba u Španjolskoj (sl. 6.). Prvi je izmjeren na području Lleide s $1\,664.3\text{ J m}^{-2}$ i maksimalnom većinom zrna od 36.5 mm (Sanchez, 2004), a drugi na području Pla d'Urgelle, s izmjerenih $1\,567.0\text{ J m}^{-2}$ i maksimalnim promjerom zrna od 56.4 mm (Farnell i sur. 2009).



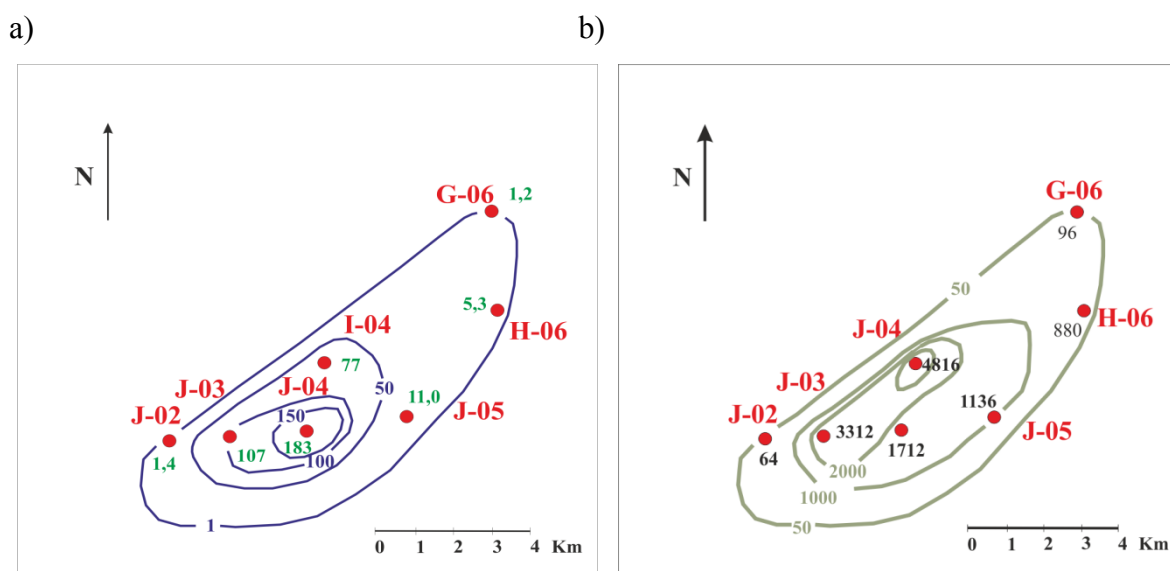
Sl.6. Promjer zrna tuče i primjeri šteta na raznim objektima nastali nakon jake oluje u Španjolskoj (Sanchez, 2004)

2.7. Odnos kinetičke energije i štete na biljnim kulturama

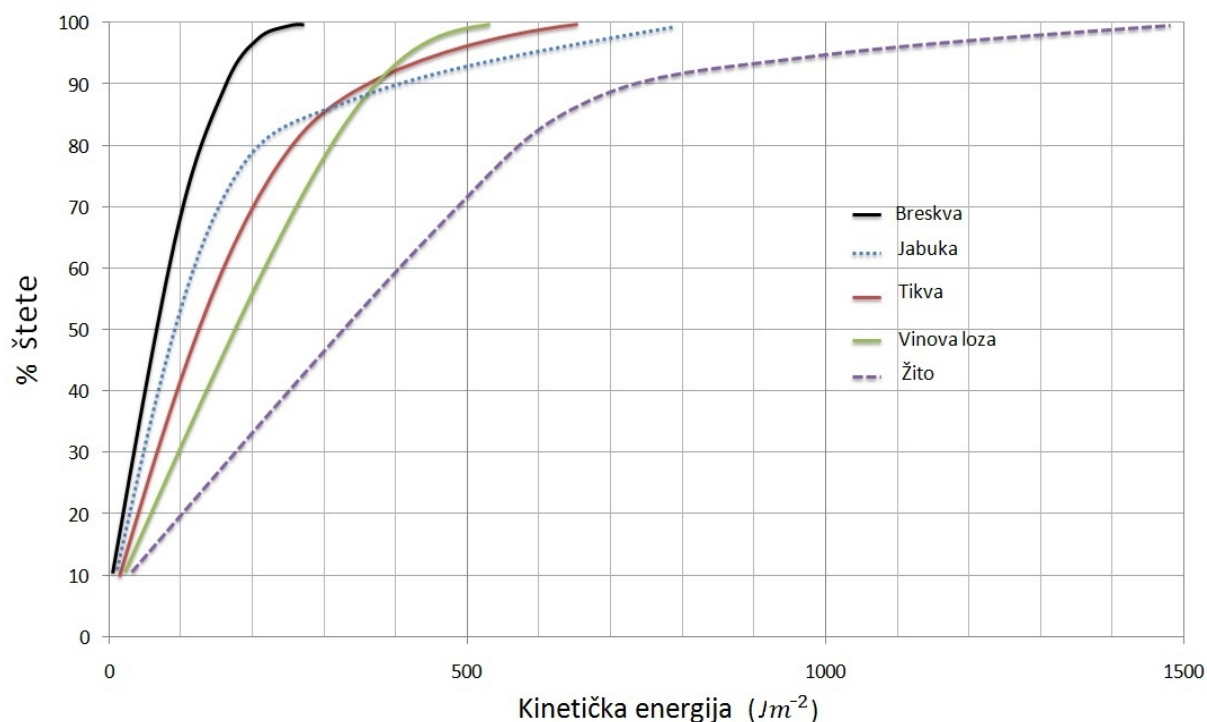
Promjeri ledenih zrna manjih od 5 mm (sugradica) ne koriste se pri izračunavanju K.E. zrna tuče (WMO, 1992). Na temelju izmjerenih vrijednosti broja zrna i njihovog polumjera može se preći na izračunavanje same mase i K.E. udara zrna tuče. K.E. i broj zrna tuče dva su najznačajnija parametra koja utječu na intenzitet oštećenja biljnih kultura (npr. Chagnon, 1970; Katz i Garcia, 1981; Fraile i sur., 2003b; Dessens i sur., 2007). Na ukupni iznos štete utječu još i brzina vjetra, fenofaza te vrsta biljne kulture (Seino, 1985). Prema Wojtív i Renicku (1973) postotak oštećenja može se povećati i do 3 puta povećanjem brzine vjetra.

Uz podatak o K.E. određuje se i zrno tuče najvećeg promjera. Promjer najvećeg zrna zabilježen na ploči tučomjera d_m , dobar je indikator potencijalne štete na biljkama te na pokretnoj i nepokretnoj imovini (Fraile i sur., 2003a), te je također ključni parametar u dinamici grmljavinskih oluja jer korelira s maksimalnom brzinom vertikalne struje i vertikalnim profilom temperature uzlazne struje (Sanchez i sur., 2009). Nelson (1983) je naglasio da umjerena vertikalna struja ima više utjecaja na rast velikih zrna nego maksimalna struja. Zrno tuče počinje padati kad je pripadna konačna brzina (V_T) veća od brzine uzlazne struje. Nelson navodi da je potrebna vertikalna brzina veća od 16 m s^{-1} da se zrno tuče promjera $1 - 2 \text{ cm}$ zadrži u oblaku.

Pojedini autori navode različite udaljenosti od tučomjera za koje smatraju da imaju iste fizičke vrijednosti parametara tuče, (broj zrna tuče i K.E.), koji pokazuju odnos između izmjerenih vrijednosti i intenziteta štete na raznim biljnim kulturama. Npr. Chagnon je 1968. godine pokazao da su do udaljenosti od 60 m parametri tuče na tlu slični, ali na udaljenosti od 200 m mogu značajno odstupati (sl. 7.). Katz i Garcia (1981) smatraju da odnos tuča – šteta nije linearan te za statističku obradu nisu koristili pravac regresije (šteta manja od 0 % i veća od 100 % nije moguća), pa su podatke koje su mjerili u radijusu od 3m od tučomjera pokušali prilagoditi logističkoj krivulji (npr. sl. 8.). Tondout i sur. (1983) pretpostavljaju da su unutar



Slika 7. Prostorna raspodjela a) K.E. (J m^{-2}) i b) broja zrna ($N_t \text{ m}^{-2}$) unutar traga tuče na poligonu za dan 10. rujana 2002. godine. Položaj i oznaka tučomjera označene su crvenom bojom). a) Izolinije (plavo) prikazuju područja s K.E. u intervalu od 1 do 150 J m^{-2} i izmjerenu K.E. na tučomjerima (zeleno). b) Izolinije (zeleno) prikazuju područja s brojem zrna u intervalu od 50 do 2000 i izmjereni broj zrna (crno) (Počakal, 2003a)



Slika 8. Odnos između izračunate K.E. ($J m^{-2}$) i iznosa štete na raznim biljnim kulturama (sve fenofaze); procjenu štete izvršilo je austrijsko osiguravajuće društvo (Svabik, 1989)

radijusa od 50 m od mjernog instrumenta vrijednosti fizičkih parametara tuče relativno homogene. Austrijsko osiguravajuće društvo „*Austria hail insurance*“ stupanj oštećenja biljnih kultura (sl. 8.) mjeri u radijusu od 100 m od tučomjera (Svabik, 1989). Iz dobivenih rezultata na slici 8. vidi se da kod K.E. udara zrna tuče većih od $200 J m^{-2}$ nastaju velike štete na većini biljnih kultura ($> 80 \%$). Ovaj granični iznos K.E. ($> 200 J m^{-2}$), dobiven na osnovu mjerenja, korišten je u ovom radu (tablica 11.). Prema dosadašnjim analizama prostornih tragova tuče na tlu, vrijednosti parametara tuče se višestruko brže mijenjaju u smjeru okomitom na dužu os traga (sl. 7.), nego u smjeru duže osi traga (Počakal, 2003a). Da bi se dobili što točniji podaci, štete na biljkama (tablica 6.) procjenjuju se u zadanom radijusu sjeverno, istočno, južno i zapadno od tučomjera (prilog 9.1.).

Tablica 6. Fenofaze najviše zastupljenih biljnih kultura u kontinentalnoj Hrvatskoj
(pojednostavljeni pregled za potrebe izvješća)

biljna kultura	fenofaza 1	fenofaza 2	fenofaza 3	fenofaza 4	fenofaza 5
pšenica-ječam	rani stadij	mliječni stadij	brašnasti stadij	zrelost	
vinova loza	vegetacija travanj - svibanj	vegetacija u lipnju	vegetacija srpanj - rujan		
kukuruz	rani stadij	metličanje	mliječna zrioba	voštana zrioba	puna zrioba
suncokret	rani stadij	cvatnja	formiranje zrna	zrelost	
duhan	rani stadij	berba lista			
paprika- rajčica	zeleni plodovi	zrioba			

2.8. Metode postavljanja tučomjera u prostoru

Od 1960. godine se za potrebe različitih istraživanja u većini zemalja s čestom pojavom tuče na određenim područjima postavljaju tučomjeri. Prema tipu istraživanja tučomjeri se postavljaju u prostoru na dva načina: na određene lokacije, lansirne i generatorske postaje, meteorološke postaje, poljoprivredna dobra i ostala pogodna mjesta (sl. 9.), ili se postavljaju pravilne mreže tučomjera – poligona na određeno područje (sl. 10.).

Osnovni parametri koji su potrebni za određivanje plošaja poligona su:

a) Potrebno je prvo odrediti vrstu projekta. Postoji mogućnost postavljanja jednog ili dva poligona, odnosno provođenje randomiziranog ili nerandomiziranog eksperimenta. Bez obzira na to na koji način se izvodi eksperiment, važno je da se radi na području sa što većim brojem dana s tučom jer to osigurava veću pouzdanost rezultata i skraćuje dužinu trajanja eksperimenta. Projekt s jednim poligonom na kojem se provodi kontinuirano tretiranje meteorološkim reagensom omogućava dobivanje statistički signifikantnog mjerenja fizičkih parametara tuče, te moguće djelovanje na smanjenje, povećanje ili nepromjenjenost pojave tuče. Za provedbu takvog projekta potrebno je kraće vremensko razdoblje, ali zahtjeva povijesne podatke s tog područja. Na jednom poligonu može se provoditi i eksperiment u kojem se slučajnim odabirom određuje dan sa zasijavanjem meteorološkim reagensom (randomizacija). Treća mogućnost provođenja eksperimenta s jednim poligonom je ta da se u prvom razdoblju provodi kontinuirano zasijavanje (2-4 god.), a u drugom se ne provodi. Kod provođenja eksperimenta s dva poligona, jedan se određuje kao ogledno, a drugi kao kontrolno područje. Zbog strogih statističkih metoda i fizičkih parametara, udaljenost između ta dva područja treba biti što manja (isto klimatsko područje), ali opet dovoljno velika da se dobiju dva statistički nezavisna niza podataka (meteorološki reagens sa jednog područja ne može dospjeti na drugo područje). Prema mišljenju Svjetske meteorološke organizacije (WMO, 1995), najjeftinija metoda ocjene uspješnosti djelovanja je provođenje eksperimenta na oglednom i kontrolnom području.

b) Cilj potencijalnog projekta vezanog uz ovakve projekte može biti mjerenje, analiza i evaluacija fizičkih karakteristika zrna tuče, analiza prostorne raspodjele tih parametara, te mogući utjecaj drugih čimbenika na te parametre. Ovisno o vrsti projekta, udaljenost između dva tučomjera unutar samog poligona može biti od nekoliko stotina metara pa do nekoliko kilometara. Veća gustoća tučomjera (udaljenost između tučomjera iznosi nekoliko stotina metara) služi za analizu strukture traga tuče, dok je za potrebe projekta ocjene klimatskih

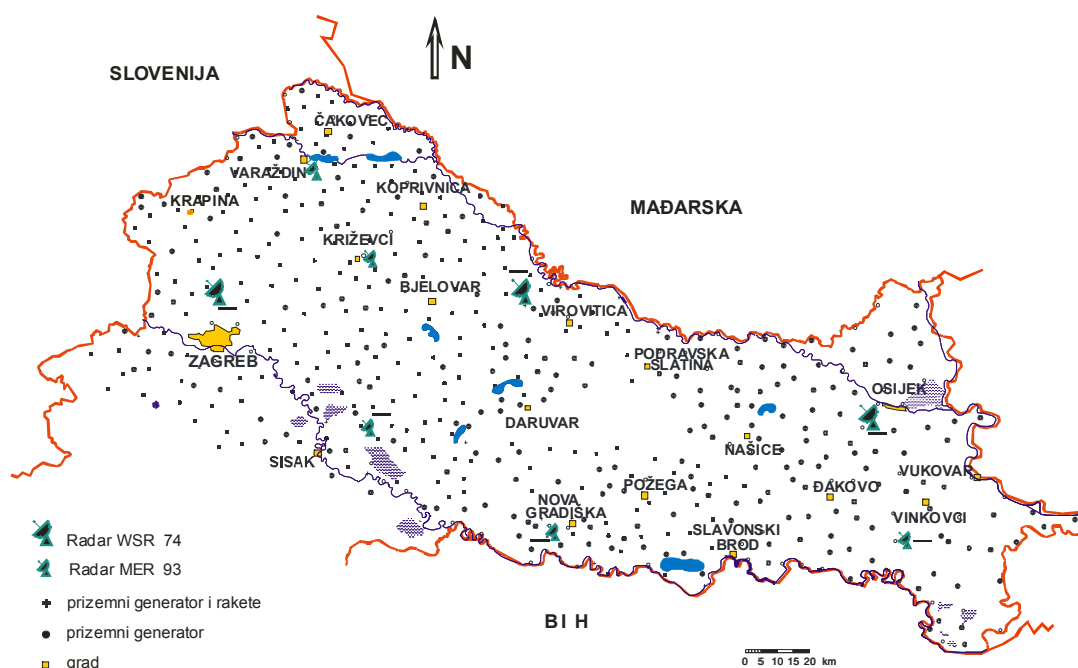
karakteristika i evaluacije dopušten (u smislu verifikacije) maksimalni razmak između tučomjera do 2 km (1 tučomjer na 4 km² ; npr. Svabik, 1989; Ferari, 1993).

c) Dimenziju i orijentaciju poligona treba odabrati tako da on bude dovoljno velik da registrira mogući cijeli ili veći dio traga tuče na tlu. Minimalne dimenzije takvog poligona trebale bi biti 30 km x 20 km (takav poligon sadrži 150 tučomjera). Poligon je potrebno orijentirati tako da se duža os poligona poklapa sa smjerom najčešćeg nailaska nepogoda.

d) Pri odabiru projekta sa oglednim i kontrolnim poligonom klimatsko i geografsko područje treba biti isto ili vrlo slično za oba poligona.

e) Dobra radarska pokrivenost poligona potrebna je radi mjerenja parametara Cb-ćelije iznad poligona.

f) Suradnja stanovništva, lokalne samouprave i osiguravajućih agencija je potrebna kod postavljanja, mjerenja i održavanja poligona, te radi mogućnosti procjene nastalih šteta na biljnim kulturama.

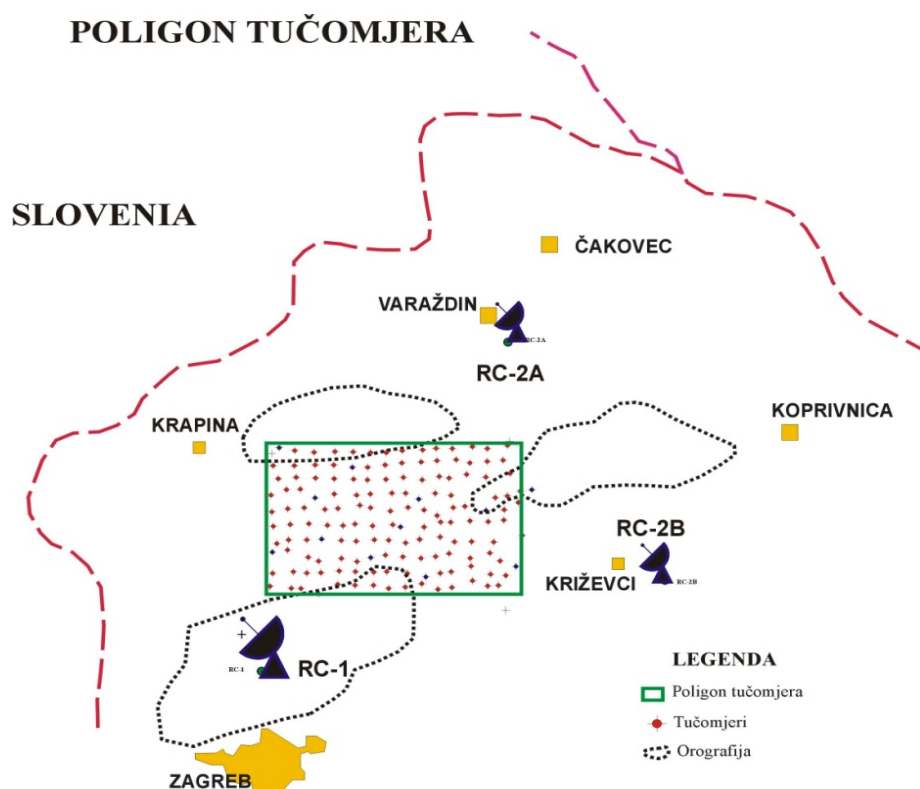


Slika 9. Prostorna raspodjela tučomjera u kontinentalnom dijelu Hrvatske (bez poligona).

Simboli su objašnjeni u lijevom donjem dijelu slike

2.9. Postavljanje poligona tučomjera u Hrvatskoj

Uzimajući u obzir prethodno navedene parametre na području SZ Hrvatske, a prema projektu “Ocjena efikasnosti djelovanja OT-a pomoću poligona tučomjera” (Počakal, 2002), za lokaciju poligona je, prema prethodno navedenim uvjetima (poglavlje 2.8 od a do f) određeno područje Zagorja, koje se nalazi između planina Ivančice i Medvednice na području triju radarskih centara (RC-1 Puntijarka, RC-2A Varaždin i RC-2B Trema; sl. 10.). Statistička analiza gibanja oblačnih ćelija na području SZ Hrvatske pokazuje da su najčešći smjerovi nailaska nepogoda zapadni (W, NW i SW; Počakal i sur., 2009). Ovisno o terenu, smjer duže osi ili dijagonale poligona orijentirati u smjeru zapad – istok. Poligon ima dimenzije 20 km x 30 km, unutar njega nalazi se 13 lansirnih postaja, a određene su mikrolokacije za još 137 mjesta na koja su postavljeni tučomjeri, tako da se na poligonu nalazi 150 tučomjera. Tučomjer se sastoji od stalka i tučomjerne ploče dimenzija 0.25 m x 0.25 m x 0.02 m (Počakal, 2002). Poligon je podijeljen u 10 redova od A do J i u 16 kolona od 1 do 16 (što su ujedno i oznake pojedinih tučomjera). Ciljana udaljenost između dva tučomjera je ~ 2 km.



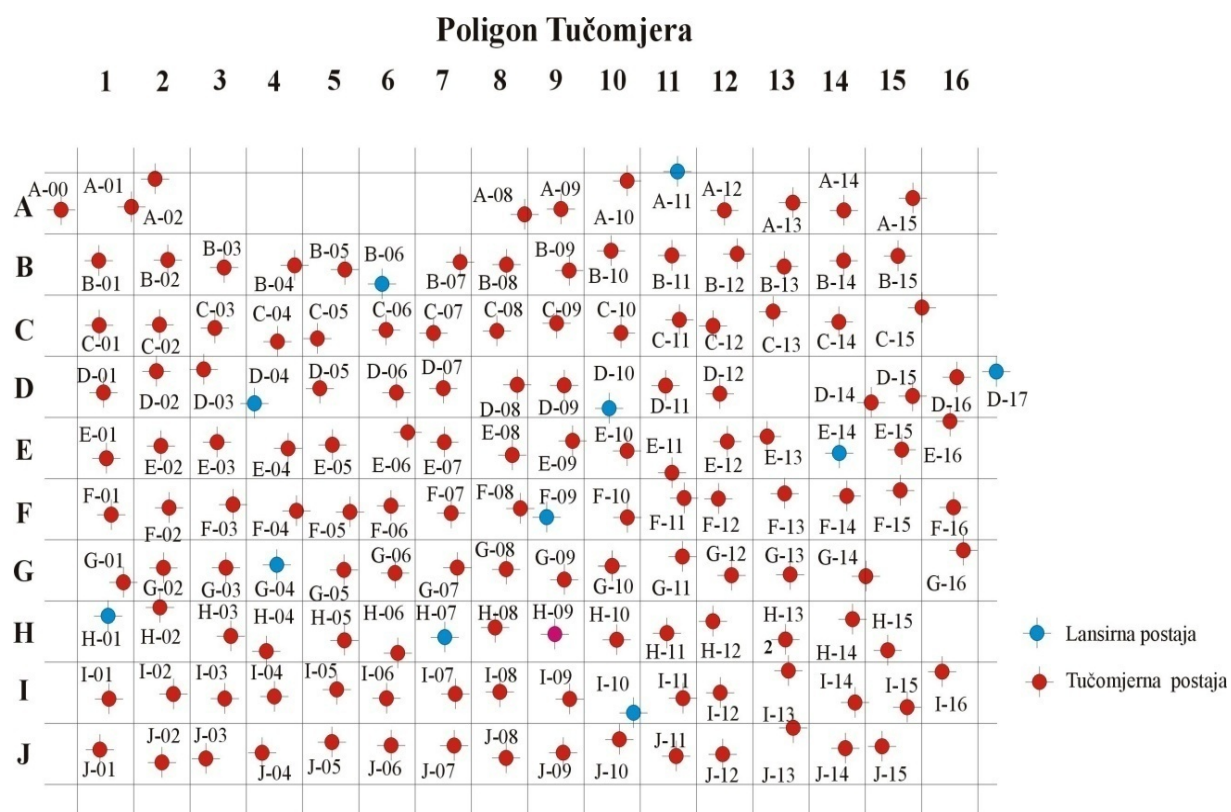
Slika 10. Položaj poligona na području Zagorja. Simboli su objašnjeni u desnom donjem dijelu slike

Položaj i oznake tučomjera unutar poligona prikazani su na slici 11. Odabirom poligona na području Zagorja, koje ima najveći srednji broj dana s tučom (Počakal i sur., 2009), pristupačni teren i gustu naseljenost od 180 naselja (digitalni atlas Republike Hrvatske), omogućeno je postavljanje tučomjera na dvorišta i imanja lokalnog stanovništva koje njima rukuje i skuplja podatke kao što se radi i na lansirnim postajama. Na taj je način izbjegnuta glavni nedostatak ostalih poligona u svijetu - točno vrijeme padanja tuče (npr. Sioutas, i sur., 2009). Za određivanje mikrolokacija pojedinih tučomjera korištene su karte “specijalke” i GPS uređaji kojima su određivane koordinate u 5 Gauss-Krügerovoj zoni (tablica 7.; prilog 9.2.), za svaki tučomjer pronađena je osoba s kojom je sklopljen ugovor, a koja će brinuti o izmjeni tučomjernih ploča i izvještavati radarske centre o eventualnim pojavama. Na terenu je ujedno izvršena obuka ljudi koji će se brinuti o tučomjeru, o načinu promjena tučomjernih ploča, označavanju ploča i načinu popunjavanja obrazaca o vrsti i vremenu meteoroloških pojava. Prilikom postavljanja poligona uočili su se određeni problemi u mikrolociranju tučomjera zbog nepristupačnih šumovitih dijelova terena ili nenaseljenosti područja na južnim obroncima Ivančice (dio A linije; sl. 11.).

Tablica 7. Koordinate rubnih točaka poligona prikazane u 5 zoni Gauss-Krügerove projekcije (npr. Frančula i sur., 1997)

	NW (m)	SW (m)	NE (m)	SE (m)
X	5577780	5575600	5608440	5608330
Y	5115400	5094920	5115800	5096160

Operativno postavljanje tučomjera na poligon započeto je 18. ožujka 2002. godine s tri ekipe na terenu i koordinаторom u Zagrebu. Svaka je mikrolokacija ucrtavana na kartu i prema potrebi pomicala. Postavljanja poligona završeno je 4. travnja 2002. godine (sl. 11.). Način postavljanja, rukovanja i skupljanja podataka poslužioca na tučomjernim mjestima, kao i obrada ploča tučomjera prikazani su u prilogu 9.1. ovog rada.



Slika 11. Prostorna raspodjela položaja tučomjera unutar poligona (broj tučomjera =150)

3. BAZA PODATAKA

Za vrijeme sezone djelovanja obrane od tuče (svibanj-rujan), u razdoblju od 2002. do 2009. godine, na glavnim meteorološkim postajama (GMP) i postajama sustava obrane od tuče (LP) skupljeno je 2 276 tučom oštećenih ploča tučomjera (LT). Kod oko 300 slučajeva padanja tuče i sugradice javljeno je da tuča nije ostavila traga na ploči tučomjera. Ovaj broj izmjerenih slučajeva tuče tučomjerima na postajama (GMP + LP) u kontinentalnom dijelu Hrvatske obuhvaća oko 70 % svih registriranih i javljenih slučajeva sugradice i tuče na svim postajama u tom razdoblju.

Za potrebe pohrane i kasnije analize parametara tuče izmjerene tučomjerom, izrađena je baza podataka u koju ulaze sljedeći podaci: mjesto - područje radarskog centra (RC), datum (GOD., MJESEC i DAN), broj tučomjera (LT), početak i dužina trajanja padanja (VRIJEME i TRAJANJE), svi izmjereni fizički parametri tuče te podatak o pojavi štete u blizini (0-100 m) tučomjera (STE) i naziv kvadranta u kojem se postaja/tučomjer nalazi (KVD). Primjer navedene baze podataka prikazan je u tablici 8. Zbog bolje usporedbe i prostorne analize dobivenih podataka, kontinentalni dio Hrvatske podijeljen je na kvadrante (9 km x 9 km). Pri određivanju veličine kvadranta, pazilo se na to da oni budu što manji, ali da se u svakom kvadrantu nalazi barem jedna postaja, odnosno tučomjer (Počakal, 2003b). Na taj način dobiveno je 136 kvadranta koji u cijelosti pokrivaju kontinentalni dio Hrvatske.

Tablica 8. Baza podataka izmjerenih parametara tuče

RC	GOD	MJ	DAN	LT	VRIJ	TRAJ	max	7,5	10,0	12,5	15,0	17,5	20	22,5	25	27,5	30	32,5	35	37,5	40	N	sre	M	K.E.	TOK	STE	KVD
1	2001	7	1	1007	18,54	3	12,8	288	656	368	64											1376	9,1	585,6	33,4	185,4	DA	C05C
1	2001	7	2	1010	18,55	10	7,8	32	16													48	7,1	8,9	0,3	0,6	NE	C06A
0	2001	8	10	D04	17,41	8	18,8	48	64	80	64	16	16									288	11,1	246,5	20,7	43,2	DA	D06A
0	2001	8	10	B06	17,50	10	13,0	176	224	64	16											480	8,3	158,2	8,4	13,9	DA	D06A
2	2001	7	16	2014	21,50	1	11,1	288	176	32												496	7,5	113,0	5,0	83,0	NE	E04D
2	2001	7	16	2073	22,07	5	16,9	160	240	256	128	64										848	10,4	569,2	42,2	140,6	DA	F05B
2	2001	7	30	2059	13,22	1	22,2	224	320	32	0	0	0	32								608	8,6	299,6	28,2	469,6	NE	E05B
2	2001	7	30	2064	13,30	1	6,7	32														32	6,3	3,7	0,1	1,9	NE	E05B
2	2001	7	1	2050	18,02	1	6,8	352														352	5,5	40,8	1,2	20,6	NE	D04D

Ovaj primjer, uzet iz baze podataka (tablica 8.), u prvom redu prikazuje izmjerene fizičke parametre tuče koja je padala 1. srpnja 2001. godine na lansirnoj postaji 7 (LT=1007, broj tučomjera) Radarskog centra Sljeme (1) u vremenu od 18:54 do 18:57 sati. Broj tučomjera dobije se kombinacijom oznake radarskog centra sa brojem pripadne lansirne, generatorske ili

glavne meteorološke postaje. Na tom mjernom mjestu u 3 minute palo je 1 376 zrna tuče na površinu od 1 m², a promjeri zrna bili su od 5 do 12.8 mm i srednjim (izračunatim) promjerom od 9.1 mm. Oznaka „DA“ pokazuje da je tuča s K.E. od 33.4 J m⁻² uzrokovala štetu na biljnim kulturama u radijusu do 100 m od tučomjera. Za potrebe analize odnosa K.E. tuče i stupnja oštećenja biljnih kultura u različitim fazama razvoja (fenofazama) pomoću formulara nazvanog „Izvešće o šteti“ (vidi prilog 9.1), nakon tuče skupljaju se podaci o šteti u neposrednoj blizini tučomjera (do 100 m). U tablici 9. (prvi redak) se vidi da je 28. lipnja 2005. godine na tučomjernom mjestu 2062, K.E. tuče na udaljenosti do 50 m sjeverno od tučomjera, oštetila pšenicu u fenofazi 2 (mliječni stadij) oko 20 %.

Tablica 9. Baza podataka oštećenja i fenofaze biljnih kultura. Opis simbola je slijedeći: LT – broj tučomjera; GOD, MJ, DAN – datum; VJET – brzina vjetra (0, 1, 2, 3); V-SMJER - smjer vjetra; KIŠA – (bez kiše, slaba, jaka, vrlo jaka); SMJ – smjer oštećenog polja od tučomjera (N, S, E, W); UDA – udaljenost polja; B-KULT – vrsta biljne kulture; FEN – fenofaza (tab. 5.); STET – procijenjena šteta (%); UKU POVR. – veličina ukupne površine zahvaćene tučom (km²); K.E. – izmjerena kinetička energija (J m⁻²); ZRNA – broj zrna (m⁻²)

LT	GOD	MJE	DAN	VJET	V-SMJ	KIŠA	SMJ	UDA	B-KULT	FEN	STET	SMJ	UDA	B-KULT	FEN	STET	UKU POVR	K.E.	ZRNA
2062	2005	6	28	2	nw	j	N	50	psenica	2	20						2x1	19,6	608
9078	2005	6	28	2	nw	s	S	20	psenica	4	20	S	70	psenica	4	20	1X1,5	114,0	992
3102	2005	7	1	2		j	W	50	psenica	3	20	N	100	kukuruz	4	40		67,3	2896
3039	2007	5	15	2	nw	u	W	50	psenica	1	20							58,1	1104
3039	2007	5	15	2	nw	u	S	50	psenica	1	20							58,1	1104
6062	2007	5	22	2	n	j	N	50	psenica	3	20	N	100	psenica	3	20	3 x 2	33,9	784
6075	2007	6	11	3	nw	j	N	50	psenica	2	20	N	100	psenica	2	20	3 x 2	110,7	2592
6075	2007	6	11	3	nw	j	W	50	psenica	2	20	W	100	psenica	2	25		110,7	2592
6075	2007	6	11	3	nw	j	S	50	psenica	2	20	S	100	psenica	2	20		110,7	2592
6099	2008	7	4	2	nw	j	N	50	psenica	4	20	N	100	psenica	4	20	2 X 1,5	16,0	272
6051	2008	6	11	2	sw	j	N	50	psenica	3	20	N	100	psenica	3	20	2 X 3	64,7	2704
3006	2008	6	27	2	n	j	W	50	psenica	3	20							196,5	3584

U ovom radu korišteni su još i podaci dobiveni s postaja obrane od tuče u razdoblju od 1981. do 2009. godine te radarski podaci za određene dane.

4. REZULTATI

U ovom radu će fizičke, vremenske i prostorne karakteristike tuče u kontinentalnom dijelu Hrvatske biti prikazane kao rezultat analize 3 822 izvješća o pojavi sugradice i tuče prikupljenih na svim postajama zajedno s 2 276 izvješća o izmjeranim fizičkim karakteristikama tuče zabilježenim na tučomjerima u vrijeme sezone (svibanj - rujan) u razdoblju od 2002. do 2009. godine. Ovaj broj podataka s tučomjera predstavlja oko 70 % svih zabilježenih slučajeva sugradice i tuče na postajama u kontinentalnom dijelu Hrvatske. U promatranom razdoblju prosječni broj dana s grmljavinom zabilježen na postajama obrane od tuče iznosio je 81, s tučom 42, a s tučom i štetom 20 (Peti, 2009). U usporedbi s podacima iz razdoblja od 1981. do 2001. (75 dana s grmljavinom, 35 s tučom i 19 dana s tučom i štetom), može se vidjeti značajno povećanje broja dana s grmljavinom i tučom u razdoblju od 2002. do 2009. godine. Primjenom t-testa statistički značajna razlika na nivou signifikantnosti od 5 % između ova dva razdoblja nađena je samo u broju dana s tučom ($p = 0.0296$). Mjesečna raspodjela pojave tuče za vrijeme sezone pokazuje da je najviše slučajeva tuče zabilježeno u lipnju (32 %), svibnju (29 %) i srpnju (16 %). Ova prva tri mjeseca sadrže gotovo sve slučajeve tuče (77 %) u sezoni.

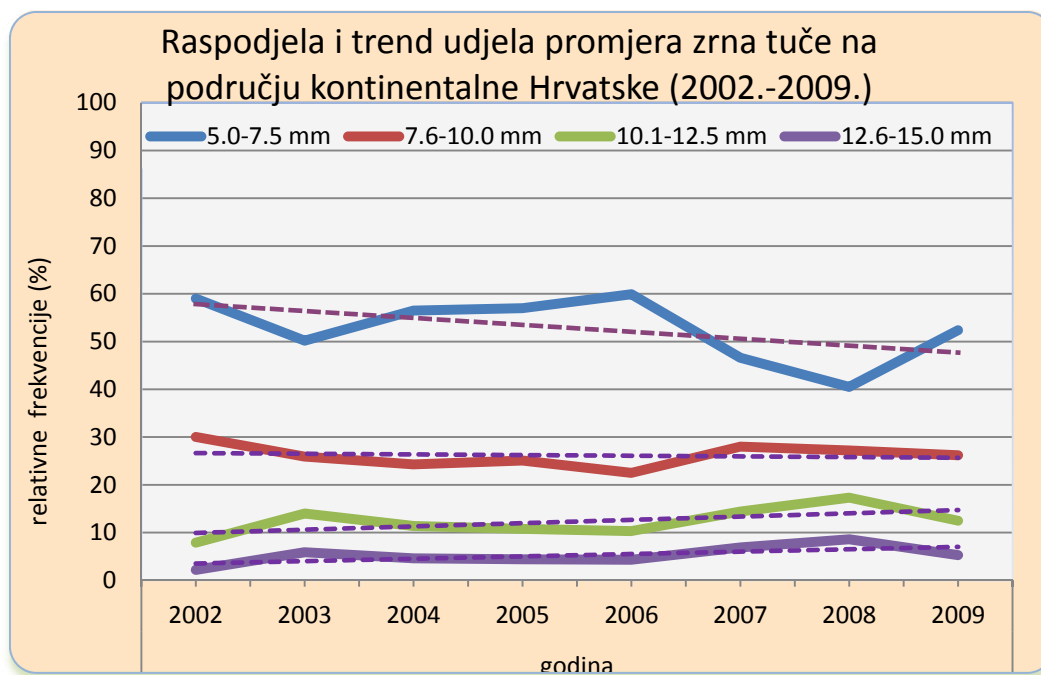
4.1. Promjer zrna tuče

U razdoblju od 2002. do 2009. godine na 2 276 tučomjera na području kontinentalne Hrvatske (u daljnjem tekstu Hrvatska) izmjereno je ukupno 2 696 981 zrna tuče. Broj zrna tuče ($N_t \text{ m}^{-2}$) kretao se od 16 do 15 104 zrna. Najviše zrna (52 %) palo je u intervalu veličine od 5 do 7.5 mm, dok je u intervalu od 7.6 do 10 mm palo 26.2 % svih zrna (tablica 10.). Najveće izmjereno zrno od 34.5 mm zabilježeno je u istočnom ravničarskom dijelu kontinentalne Hrvatske i to u tri slučaja: 20. lipnja i 21. kolovoza 2004. te 27. lipnja 2007. godine. Na osnovu svih izmjerenih i zabilježenih zrna tuče u promatranom razdoblju izračunat je srednji promjer od 8.1 mm. Na području poligona u istom razdoblju dobiveni su vrlo slični rezultati. Iz tablice 10. može se vidjeti da je udio zrna manjeg promjera (5 - 10 mm) nešto manji (51.5 %) u odnosu na vrijednosti dobivene na cjelokupnom području Hrvatske. Ta mala razlika se vidi kod izračunavanja srednje vrijednosti promjera zrna tuče na području poligona od 8.2 mm. Najveće zrno tuče izmjereno na poligonu imalo je promjer od 28.5 mm. Prosječni broj zrna tuče od 907 m^{-2} na poligonu manji je od broja zrna tuče na cjelokupnom području Hrvatske koji iznosi $1\,185 \text{ zrna m}^{-2}$.

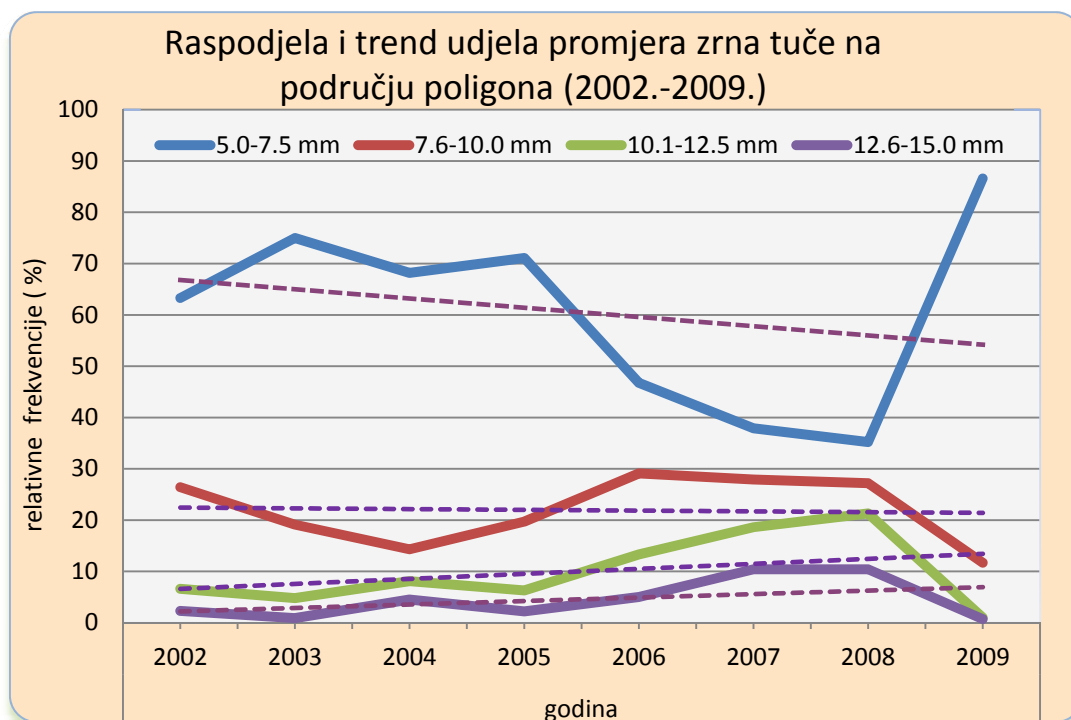
Tablica 10. Ukupni broj zrna za svaku klasu promjera širine 2.5 mm (od 5.1 - 35 mm) izmjerenu pomoću tučomjera na području kontinentalne Hrvatske (HRV) i poligona (POL) u razdoblju od 2002. do 2009. godine (N – ukupni broj zrna tuče; B – ukupni broj ploča tučomjera; C – prosječni broj zrna tuče po jediničnoj površini (m⁻²))

	promjer (mm)												N	B	C
	5 do 7.5	10	12.5	15	17.5	20	22.5	25	27.5	30	32.5	35			
HRV.	1407061	707746	338194	146260	60128	24121	7648	3136	1376	880	432	128	2696981	2276	1185
%	52.2	26.2	12.5	5.4	2.2	0.9	0.3	0.2	0.06	0.04	0.02	0.01	100	-	-
POL.	177512	85296	46800	21518	8880	3344	672	320	176	48	0	0	344566	380	907
%	51.5	24.7	13.6	6.2	2.6	1.0	0.2	0.1	0.05	0.012	0	0	100		

U promatranom je razdoblju za svaku godinu za područje Hrvatske i poligona napravljena analiza udjela relativne frekvencije broja zrna promjera između 5 i 35 mm (tablica 10.) u 12 klasa, te su izračunati trendovi. S obzirom da je u prve četiri klase (5 do 15 mm) obuhvaćeno i više od 96 % od ukupnog broja zrna tuče (kako na području Hrvatske tako i na području poligona), težište je stavljeno na analizu godišnjih vrijednosti relativne frekvencije zrna tuče promjera između 5 i 15 mm smještenih u 4 klase. Uspoređujući godišnje podatke za područje Hrvatske u razdoblju od 2002. do 2009. godine, može se vidjeti da je trend udjela zrna tuče najmanjeg promjera (5 – 7.5 mm) u padu, dok je udio zrna većeg promjera (10.1 - 15 mm) u porastu (sl. 12.).



Slika 12. Godišnja raspodjela udjela promjera zrna tuče (5 - 15 mm) i trend (isprekidana linija) u razdoblju od 2002. do 2009. godine na području kontinentalne Hrvatske



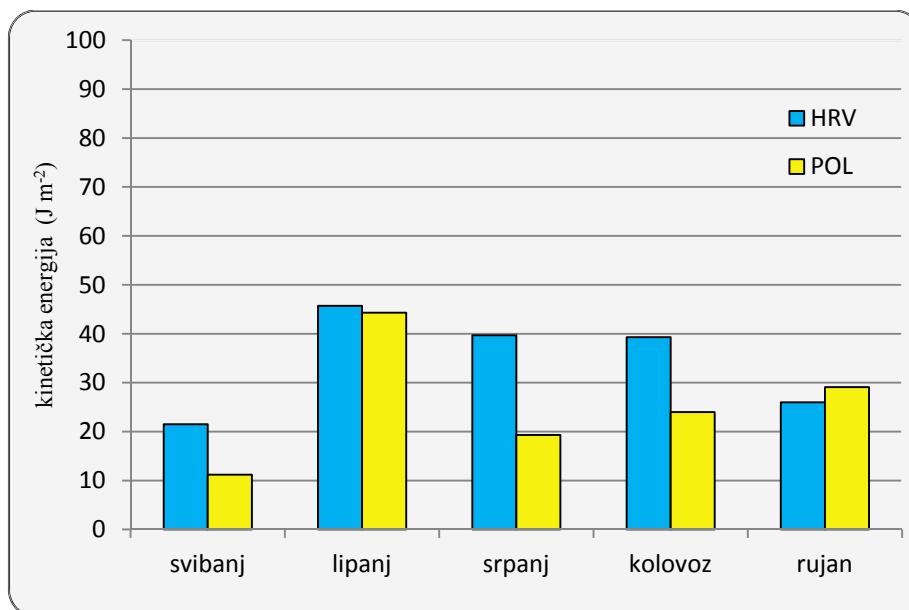
Slika 13. Godišnja raspodjela udjela promjera zrna tuče (5 - 15 mm) i trend (isprekidana linija) u razdoblju od 2002. do 2009. godine na poligonu

Na području poligona je, kao i na cijelom području Hrvatske, zabilježen negativni trend udjela promjera zrna tuče u prve dvije klase (5 - 10 mm), dok su udjeli broja zrna tuče promjera klasa od 10.1 do 15 mm u porastu, uspoređujući godišnje podatke za razdoblje od 2002. do 2009. godine (sl. 13.). Trendovi su jače izraženi na poligonu nego na cijelom području Hrvatske, iako prema standardnim statističkim testovima (npr. Storch i Zwiers, 2004) ti trendovi nisu signifikantni, što i nije iznenađujuće s obzirom da je razdoblje od osam godina kratko za procjenu klimatskog trenda tuče (Počakal, 2011).

4.2. Kinetička energija K.E.

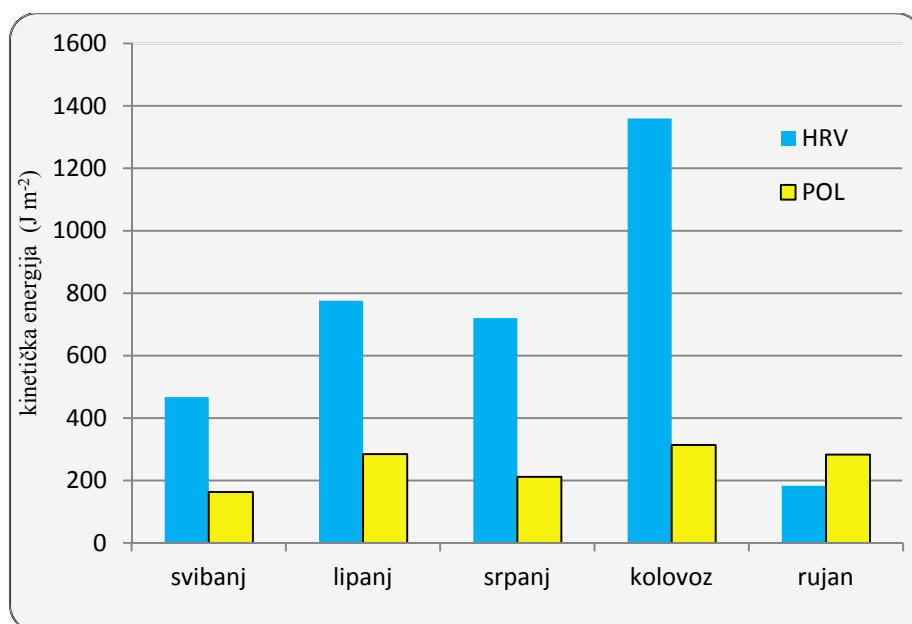
Primarni parametar dobiven mjerenjem tuče pomoću tučomjera je K.E. koja predstavlja intenzitet tuče na jednom mjestu (*point hailfall*). Izmjerene vrijednosti K.E. u Hrvatskoj u razdoblju od 2002. do 2009. godine kreću se od 0.1 do 1 359.6 J m⁻². Srednja K.E. za razdoblje od 2002. do 2009. godine na području Hrvatske iznosi 36 J m⁻². Mjesečne srednje

vrijednosti K.E. (sl. 14.) su najveće u lipnju (45.7 J m^{-2}). Bliske vrijednosti zabilježene su i u srpnju (39.7 J m^{-2}) te kolovozu (39.3 J m^{-2}). Minimalna vrijednost zabilježena je u svibnju (21.5 J m^{-2}). Na osnovu podataka o mjesečnoj raspodjeli čestine tuče i srednje K.E. može se zaključiti da je najčešća i najintenzivnija konvektivna aktivnost na području Hrvatske u lipnju, kada je i nestabilnost atmosfere najveća (Počakal, 2011).



Slika 14. Prosječna mjesečna kinetička energija (J m^{-2}) u kontinentalnom dijelu Hrvatske i na poligonu od 2002. do 2009. godine

Srednja vrijednost K.E. na poligonu u razdoblju od 2002. do 2009. godine iznosi 27.7 J m^{-2} , dok su raspodjele srednjih mjesečnih vrijednosti K.E. na poligonu nešto manje od vrijednosti izmjerenih na cjelokupnom području Hrvatske, osim za rujnu kada je ona nešto veća i iznosi 29.1 J m^{-2} . Analizirajući maksimalne vrijednosti K.E. (sl. 15.) vidi se da kolovoz, s izmjerenom energijom od 1359.6 J m^{-2} , značajno odskake od izmjerenih maksimalnih vrijednosti u ostalim mjesecima, kada one ne prelaze 800 J m^{-2} . Sve izmjerene vrijednosti K.E. na poligonu značajno su manje, osim one od 283.2 J m^{-2} izmjerene u rujnu. Analizirajući raspodjelu godišnjih vrijednosti čestina intenziteta K.E. na području Hrvatske i poligona, uzeta je širina intervala K.E. dobivena na osnovu stupnja oštećenja biljnih kultura prikazanih u tablici 11.



Slika 15. Maksimalna izmjerena kinetička energija (J m^{-2}) u kontinentalnom dijelu Hrvatske i na poligonu od 2002. do 2009. godine

Tablica 11. Podjela kinetičke energije po intervalima intenziteta mogućeg oštećenja različitih biljnih kultura

0.1 – 25.0 J m^{-2}	bez ili neznatna šteta
25.1 – 50.0 J m^{-2}	mala do umjerena šteta
50.1 – 100.0 J m^{-2}	umjerena do velika šteta
100.1 – 200.0 J m^{-2}	velika šteta
➤ 200.0 J m^{-2}	vrlo velika do potpuna šteta (sve biljne kulture i fenofaze)

Iz dobivenih rezultata mjerenja tuče na cjelokupnom području Hrvatske u proteklih osam godina ukupni udio K.E. u prvom (najmanjem) intervalu intenziteta oštećenja biljnih kultura (tablica 11.) kretao se, ovisno o godini, između 62 i 78 %. U klasi intervala iznad 200 J m^{-2} godišnji udjeli slučajeva tuče tog intenziteta bili su između 0.4 i 7.5 %. Na poligonu se broj slučajeva tuče s K.E. u intervalu 0.1-25 J m^{-2} kretao između 57 i 100 %. Za poligon je značajno da su se prvi slučajevi tuče s energijama većim od 200 J m^{-2} izmjerili tek u 2007. i 2008. godini. Prema svim izmjerenim parametrima karakteristika zrna tuče, godina 2009. bila je „najmirnija“ u promatranom razdoblju (2002.-2009.), to jest, svi izmjereni parametri bili su daleko manji nego proteklih godina. Da bi se utvrdile te razlike, tri karakteristična

srednja parametra (N_t , d_m i K.E.) izmjerena u 2009. godini, uspoređena su koristeći t-test s istim parametrima izmjerenim u ostalim godinama promatranog razdoblja (tablica 12.).

Tablica 12. Rezultati statističke analize (t-test) parametara tuče za osam vremenskih razdoblja (2002.-2009.) na području kontinentalne Hrvatske (podebljano označava maksimalne vrijednosti u promatranom vremenskom razdoblju, SD = pripadna standardna devijacija)

Sred. Vrijed.	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
N_t - broj zrna (m^{-2})	2010	1089	1220	1366	896	990	1163	1088
SD (m^{-2})	2200.15	1207.28	1858.19	1623.02	1241.74	1029.60	1252.64	1318,61
d_m - max.prom. zrna tuče (mm)	11.8	14.1	12.3	12.4	12.7	13.6	14.4	12,9
SD (mm)	3.56	4.96	5.30	4.71	5.14	4.50	5.40	4,56
K.E. ($J m^{-2}$)	30.3	35.9	37.6	33.2	22.1	32.2	53.4	31,9
SD ($J m^{-2}$)	50.23	68.86	111.02	73.34	36.43	65.42	99.58	79,50

Na području Hrvatske, u 2009. godini su u odnosu na prijašnje promatrane godine, na nivou signifikantnosti od 5 %, nađene statistički značajne razlike u broju zrna (2002. i 2005.), u maksimalnom promjeru (2002., 2003., 2007. i 2008.) i K.E. (2008.). Iz tablice 12. vidljivo je da su prosječne godišnje vrijednosti K.E. u Hrvatskoj imale vrijednosti oko 30 $J m^{-2}$ i bile su slične srednjoj K.E. za cijelo osmogodišnje razdoblje od 36 $J m^{-2}$. Jedina iznimka od tih vrijednosti vidi se kod srednjeg maksimalnog promjera i srednje K.E. izmjerenih u 2008. godini gdje su daleko najveći. Stoga 2008. je godina s najvećim intenzitetom tuče u Hrvatskoj u razdoblju od 2002. do 2009. godine.

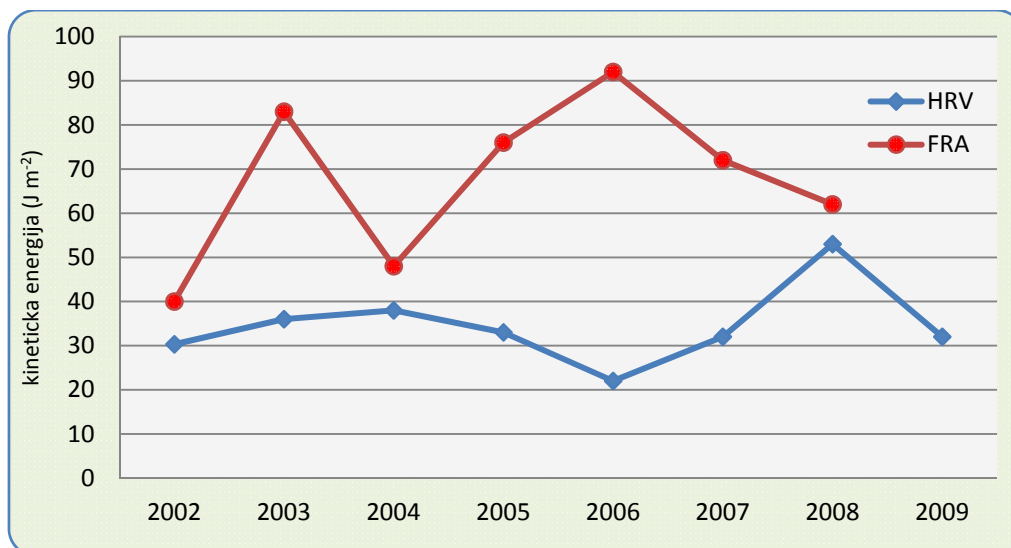
Ista usporedba napravljena je i za područje poligona, tj. uspoređeni su fizički parametri tuče u 2009. godini pomoću t-testa, s istima izmjerenim u prethodnim godinama (tablica 13.). Statistički značajne razlike prosječnih godišnjih fizičkih parametara zrna tuče na poligonu u 2009. godini su u odnosu na prijašnje promatrane godine, nađene na nivou signifikantnosti od 5 % u broju zrna (2003.), u maksimalnom promjeru (2002., 2005., 2006., 2007. i 2008.) i

Tablica 13. Rezultati statističke analize (t-test) parametara tuče za osam vremenskih razdoblja (2002.-2009.) na području poligona (podebljano označava maksimalne vrijednosti u promatranom vremenskom razdoblju, SD = pripadna standardna devijacija)

Sred. Vrijed	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
N_t - broj zrna (m^{-2})	1357	931	551	1169	720	1005	1018	423
SD (m^{-2})	2317.07	873.26	511.60	1447.11	1228.68	1162.03	1168.37	454,60
d_m - max.prom. zrna tuče (mm)	11.1	10.4	10.4	11.1	14.6	13.2	13.4	8,6
SD (mm)	4.25	2.89	6.16	3.69	6.39	4.99	4.47	2,40
K.E. ($J m^{-2}$)	22.4	8.4	19.6	15.0	29.4	38.1	40.4	2,53
SD ($J m^{-2}$)	45.36	9.13	45.21	20.39	38.47	66.70	62.39	2,87

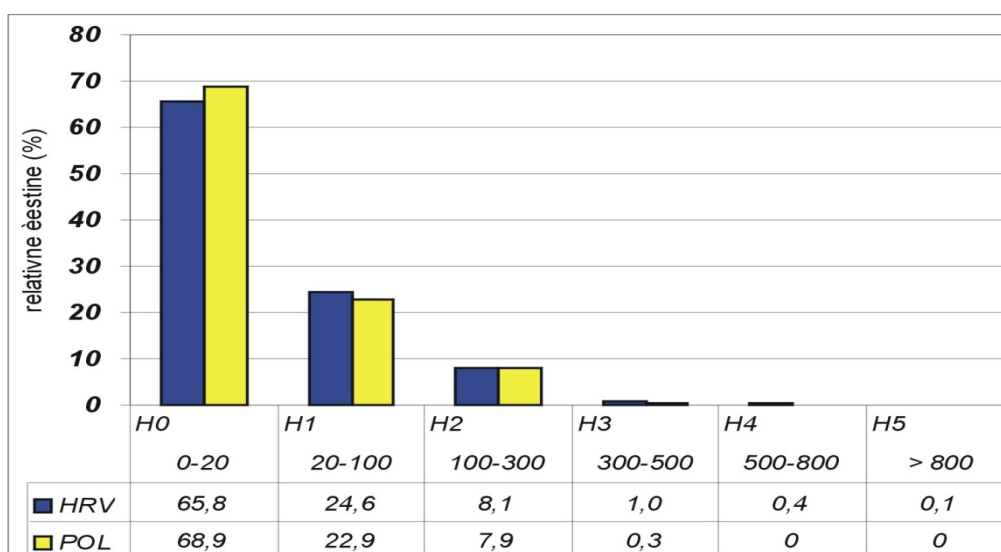
K.E. (2003., 2005., 2006, 2007. i 2008.). Za osmogodišnje razdoblje (2002.-2009.) dobivene su srednje vrijednosti za masu $380.3 g m^{-2}$ i K.E. od $27.7 J m^{-2}$. Sve godišnje srednje vrijednosti K.E. su manje od tog prosjeka, osim onih zabilježenih u 2007. i 2008. godini. Od početka mjerenja s tučomjerima u 2002. godini, svi fizički parametri (osim parametara izmjerenih u 2009. godini) pokazuju mali uzlazni trend. (Počakal, 2011). Objašnjenje za pozitivan trend udjela zrna tuče promjera između 10 i 15 mm (sl. 12. i 13.) te za povećanje maksimalnog promjera zrna tuče (tablica 12. i 13.), a time i povećanja K.E., nalazi se u povećanju maksimalne vertikalne struje i njezinom vertikalnom temperaturnom profilu unutar Cb-ćelija u promatranom razdoblju (Sanchez i sur., 2009).

Uspoređujući prosječne godišnje vrijednosti K.E. ($36 J m^{-2}$) za promatrano razdoblje u Hrvatskoj sa istim podacima izmjerenim na području Francuske koja također ima jaki pozitivan trend K.E. (sl. 16.), vidi se da su vrijednosti K.E. u Hrvatskoj dvostruko manje nego one izmjerene na području Francuske. Zbog mogućnosti lakše usporedbe istih podataka u drugim zemljama, Torro ljestvica (Webb i sur., 1986; Sioutas i sur., 2009) je korištena za prikaz distribucije K.E. izmjerene na području kontinentalne Hrvatske i poligona u razdoblju od 2002. do 2009. godine. Ova razdioba pokazuje da 65.8 % svih izmjerenih slučajeva tuče u Hrvatskoj ima K.E. manju od $20 J m^{-2}$ (H0; nema vidljive štete) a samo su tri slučaja, s intenzitetom H5 i maksimalnim promjerom zrna između 31.3 i 35.4 mm, zabilježena u tom razdoblju. Na području poligona udio slučajeva tuče intenziteta H0 je nešto veći i iznosi 68.9 %. U tom vremenskom razdoblju nisu zabilježeni slučajevi tuče intenziteta H4 i H5 (sl. 17).



Slika 16. Prosječne godišnje vrijednosti kinetičke energije za kontinentalni dio Hrvatske (tab. 12.) i za četiri područja (sl. 3.) u Francuskoj (Dessens i sur., 2009.)

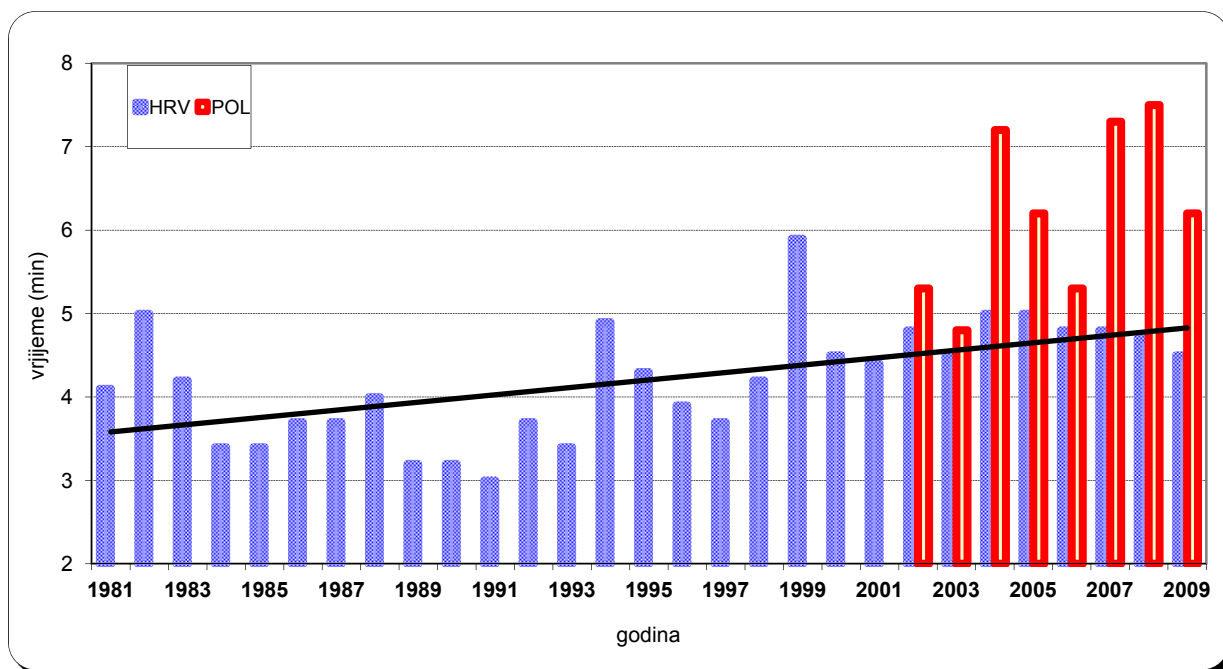
Usporedba tako dobivene razdiobe K.E. sa istom razdiobom za relativno blisko područje u Austriji (poligon kod Graza; Svabik, 2010, privatna korespodencija), pokazuje da su najveće razlike u činjenici da poligon u Austriji ima gotovo dvostruko manje slučajeva tuče intenziteta H0 (38 %) i dvostruko više slučajeva tuče intenziteta od H1 do H5 (40 %; 15 %; 4 %; 2 % i 1 %). Ovi rezultati pokazuju da je u Hrvatskoj, ali i na drugim područjima Europe (npr. Francuska i Austrija) u promatranom razdoblju došlo do povećanja grmljavinskih oluja. Mogući razlozi većih vrijednosti K.E. u Francuskoj i Austriji su pojave intenzivnijih grmljavinskih oluja uzrokovanih čestim prolaskom izraženih hladnih fronti nad tim područjem i jačom orografskom konvekcijom.



Slika 17. Distribucija K.E. (J m^{-2}) za kontinentalni dio Hrvatske (HRV) i poligon (POL), rađeno na osnovi Torro ljestvice (2002.-2009.)

4.3. Trajanje padanja tuče

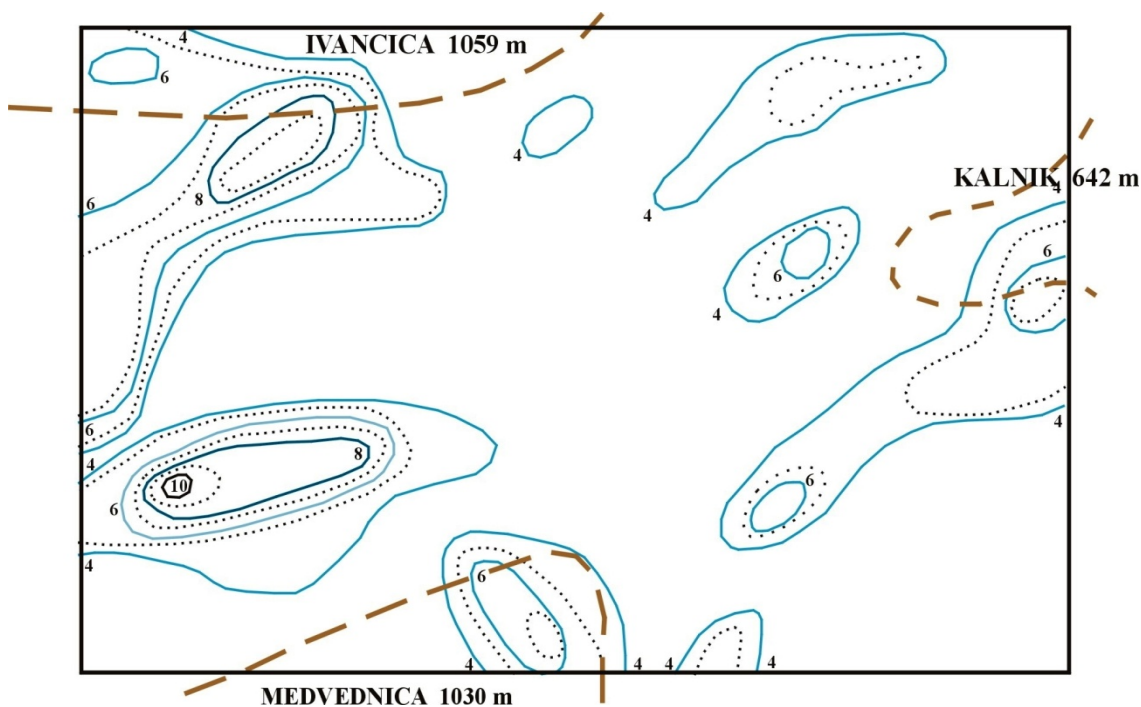
Koristeći podatke o vremenima padanja tuče na svim postajama u razdoblju od 1981. do 2009. godine, izračunato je prosječno vrijeme padanja za cijelo područje kontinentalne Hrvatske koje iznosi 4.2 minute. Prosječno trajanje padanja tuče za svaku godinu posebno (sl. 18.) pokazuje trend povećanja od 3.5 min (1981.) do 4.7 min (2009.). Pomoću Mann-Kendall-ovog testa (npr. Gilbert, 1987) testirana je statistička značajnost trenda prosječnog trajanja padanja tuče u sezoni. Dobiveni rezultati pokazuju da se može odbaciti nul hipoteza h_0 da nema trenda, tj., da se prihvaća alternativna hipoteza h_1 ($p = 0.0035 < 0.05$) koja potvrđuje da je trend pozitivan i statistički značajan (prilog 9.3). Sličan uzlazni trend, ali s dužim prosječnim trajanjem padanja tuče od 6.5 min, zabilježen je na području poligona u razdoblju od 2002. do 2009. godine.



Slika 18. Prosječno trajanje padanja tuče i trend za područje Hrvatske (1981.-2009.) i poligona (2002.-2009.). Područja su objašnjena u gornjem lijevom dijelu slike, dok je trend prosječnog trajanja padanja tuče na području Hrvatske prikazan pravcem

Najvjerojatniji razlog dužem padanju tuče na poligonu u usporedbi sa cjelokupnim područjem kontinentalne Hrvatske je utjecaj orografije na smjer i brzinu kretanja Cb ćelija, te povećanje intenziteta grmljavinskih ćelija. Kad Cb ćelija naiđe na planinsku prepreku, ona vrlo često stagnira. To se naročito događa kad je planina uska i visoka u odnosu na bazu oblaka jer dolazi do presjecanja generirajuće struje u prednji dio oblaka (Ćurić, 2001). Na

područje ovog poligona Cb ćelije dolaze uglavnom iz zapadnih pravaca (W, NW i SW) i ovisno o njihovom smjeru, uspore pred planinama Ivančicom, Medvednicom ili Kalnikom, koje okružuju poligon (Počakal i sur., 2009). Utjecaj tih planina na gibanje Cb-a, a time i na pojavu tuče, može se vidjeti na prostornoj raspodjeli pojedinih parametara tuče unutar poligona. Područja s najviše slučajeva tuče nalaze se na prostoru u neposrednoj blizini planina (sl. 19.; Počakal, 2011). Tučomjeri postavljeni na području južno od Ivančice zabilježili su u razdoblju od 2002. do 2009. godine u prosjeku 9 slučajeva s tučom. Slično područje, ali s većim srednjim brojem slučajeva tuče, može se naći sjeverno i sjeverozapadno od planine Medvednice. Jedno manje područje s povećanim brojem slučajeva tuče može se vidjeti zapadno i jugozapadno od planine Kalnik. Tučomjeri postavljeni u sredini samog poligona, bilježe minimalni broj slučajeva tuče. Broj slučajeva padanja u središtu poligona kreće se

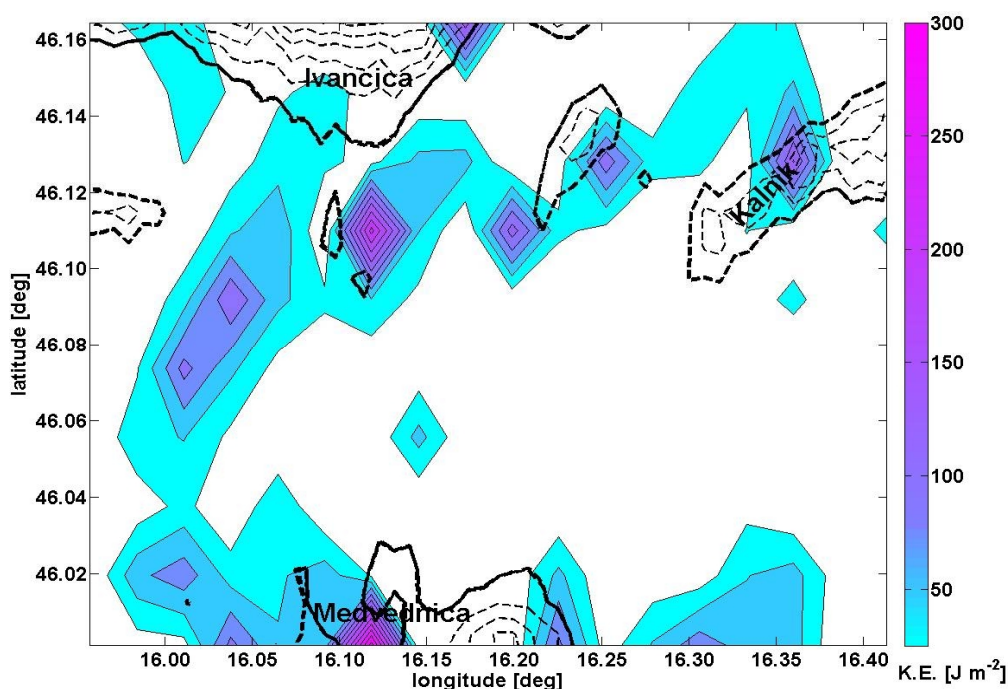


Slika 19. Prostorna raspodjela srednjeg broja slučajeva padanja tuče na poligonu u razdoblju 2002.-2009. godine (položaj poligona je na slici 7.) Izolinije (plave pune i točkaste linije) prikazuju područja s većim prosječnim brojem slučajeva s tučom (4-10) Planine su naznačene sa smeđom isprekidanom linijom zajedno s maksimalnom visinom. Slika je preuzeta iz Počakal (2011)

prosječno između 0 i 2 slučaja u promatranom razdoblju (Počakal, 2011). Mogući dodatni razlog rjeđoj pojavi tuče na tom području je topljenje zrna tuče zbog dužeg padanja kroz topli sloj zraka što je posljedica nešto manje prosječne nadmorske visine središnjeg dijela poligona. Prostorna analiza pokazuje da se manje područje s prosječnim trajanjem padanja tuče

između 10 i 20 min nalazi južno od Ivančice i sjeverozapadno od Medvednice. To se područje u velikoj mjeri prostorno poklapa s područjima najčešćeg padanja tuče (sl. 19.) i područjima s maksimalnom K.E. koja se nalaze između tih dviju planina (Počakal i Večenaj, 2011).

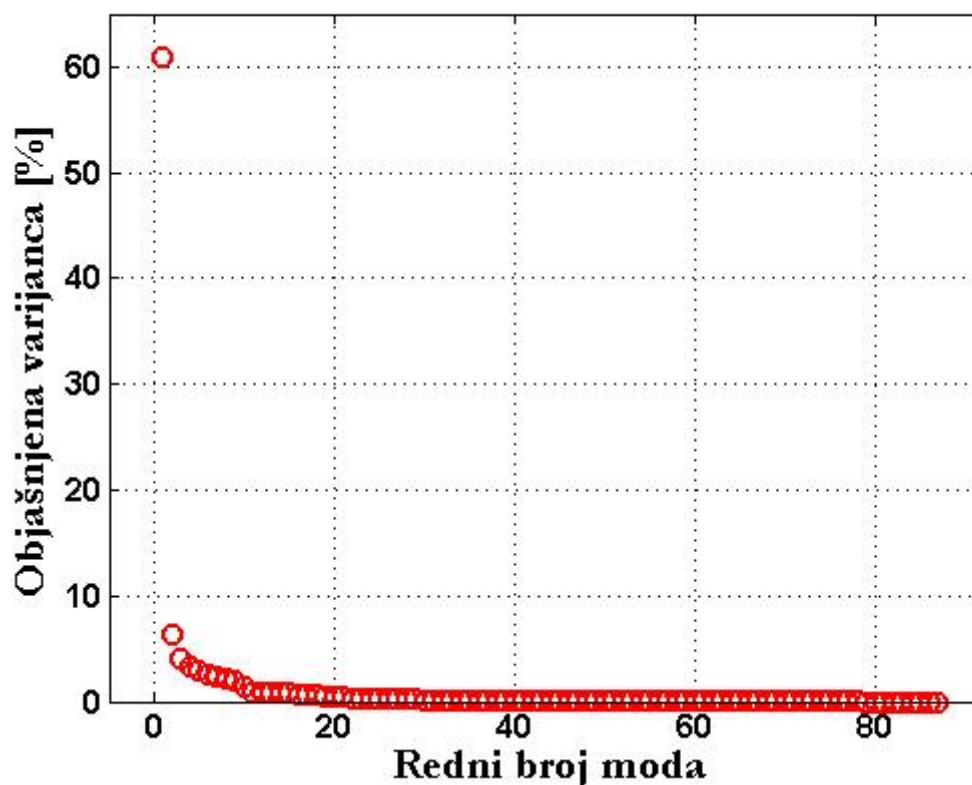
Provjera ovih rezultata izvršena je pomoću metode empiričkih ortogonalnih funkcija (EOF), gdje su analizirani parametri zrna tuče skupljeni na poligonu u promatranom razdoblju (K.E., d_m i dužina padanja), kako bi se utvrdilo koji vanjski faktori imaju utjecaj na prostorne i vremenske distribucije tih parametara (Počakal i Večenaj, 2011). EOF analiza je primijenjena na 87 x 150 matricu, organiziranu na načina da svaki stupac predstavlja vremenski niz za određenu točku (npr. Ludwig i sur., 2004). U ovom radu prikazani su rezultati samo za K.E. Slika 20. prikazuje prostornu raspodjelu srednje K.E. za poligon na kojoj se vidi kako raspodjela srednje K.E. odgovara spomenutoj raspodjeli planina, dok slika 21. prikazuje postotak varijance prostorne raspodjele srednje K.E. objašnjene s određenim modom EOF



Slika 20. Prostorna raspodjela srednje K.E. na poligonu u razdoblju od 2002. do 2010. godine (obojene površine). Crne isprekidane linije označavaju izohipse planina svakih 50 m, s početnom visinom od 270 m. Slika preuzeta iz Počakal i Večenaj (2011)

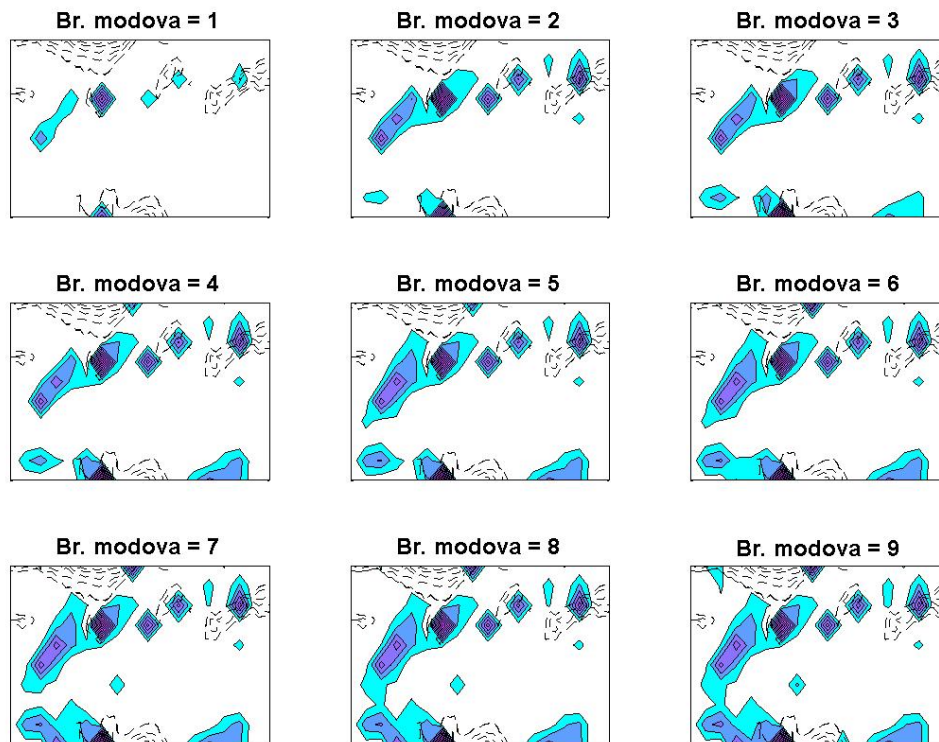
analize. Vidi se da prvih 9 modova objašnjava približno oko 86.6 % varijabilnosti raspodjele srednje K.E. na poligonu. Rekonstrukcija te raspodjele koristeći različiti broj modova indicira da sam prvi mod koji objašnjava 61 % varijabilnosti, pokazuje veliki utjecaj Ivančice na sjeveru poligona kod raspodjele srednjih vrijednosti K.E. ispred i paralelno s planinom. Prvi mod također otkriva određeni utjecaj Kalnika i Medvednice (sl. 22). Drugi, treći i četvrti mod,

koji ukupno objašnjavaju 13.8 % varijance, pokazuju sekundarni utjecaj Medvednice na raspodjelu tuče zapadno i istočno od planine. Peti i šesti mod objašnjavaju ukupno 5.4 % varijabilnosti, te proširuju i spajaju područja ispred Ivančice i Medvednice. Mala je razlika u rekonstrukciji koristeći osmi i deveti mod, ali se vidi da prvih devet modova objašnjava 86.6 % varijabilnosti i rekonstruira razdiobu srednje K.E. uspješno. Dakle, EOF analiza potvrđuje veliki utjecaj orografije na distribuciju parametara tuče na što je ukazano već u radovima Počakal i sur. (2009) i Počakal (2011). Ivančica ima najveći utjecaj jer usporava ili čak zaustavlja Cb-ćelije koje na područje poligona najčešće dolaze iz pravca zapada i jugozapada. Također potvrđeni su sekundarni utjecaji Kalnika na sjeveroistoku i Medvednice na jugu. Prostorna analiza raspodjele d_m (nije prikazano) pokazuje pojavu većih zrna tuče ispred



Slika 21. Postotak varijance prostorne razdiobe srednje K.E. objašnjene s određenim modom EOF analize

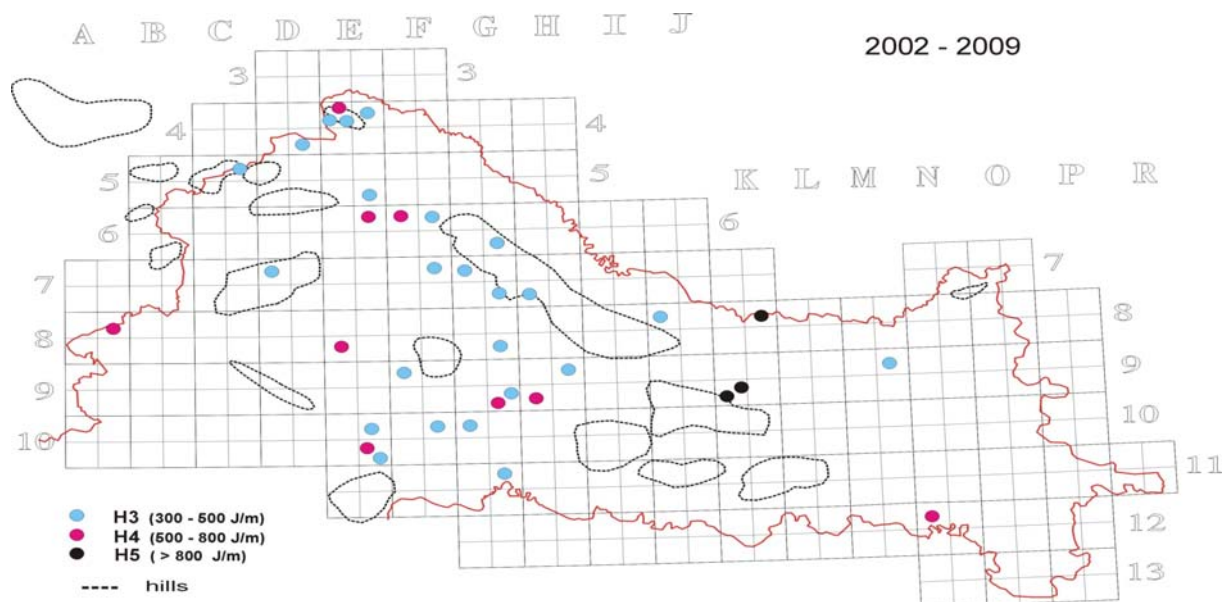
planina, što ukazuje na dodatno intenziviranje Cb-ćelija, tj. porast vertikalne struje unutar Cb ćelije ispred planina (Počakal i Večenaj, 2011).



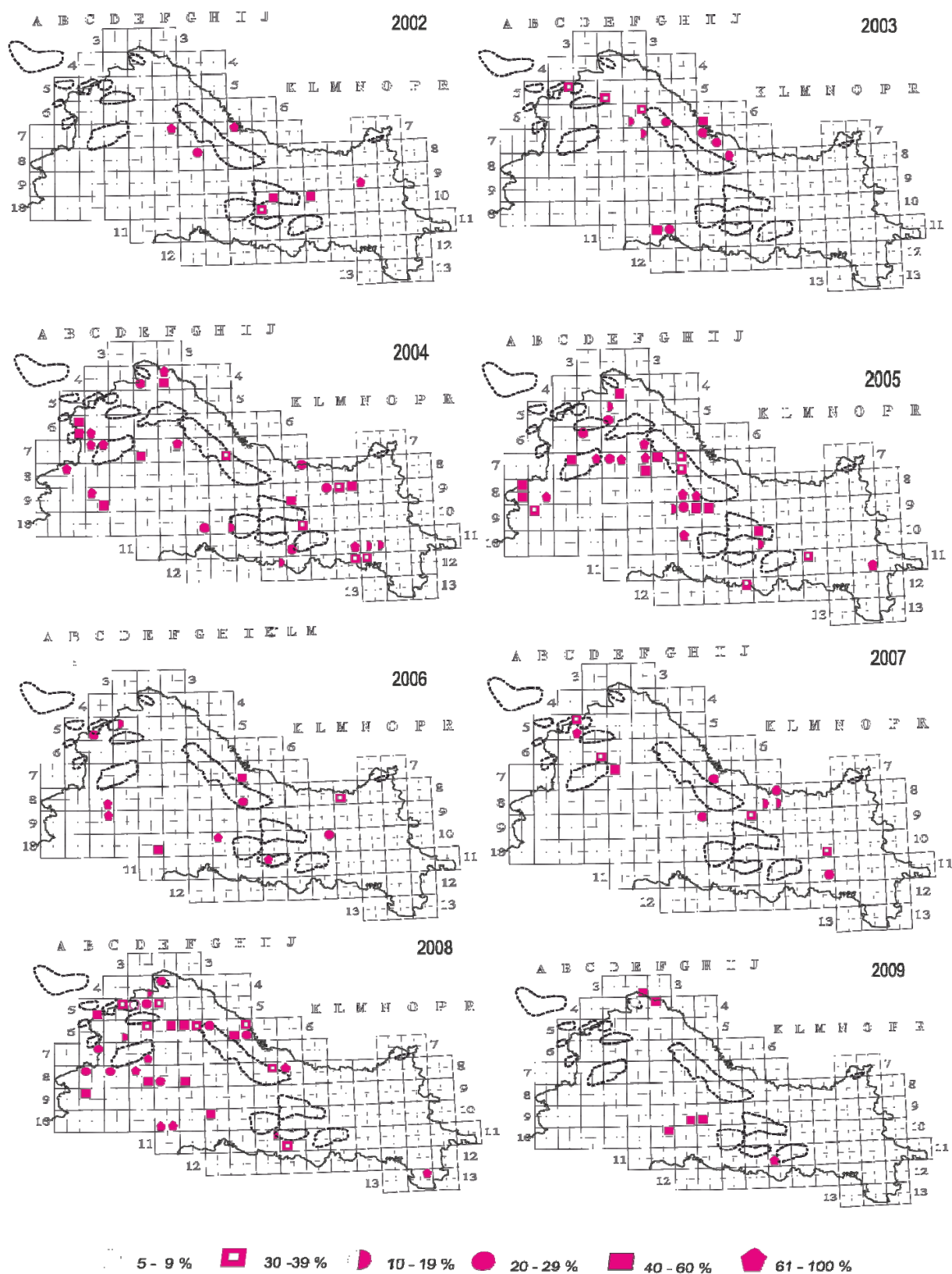
Slika 22. Prostorna raspodjela srednje K.E. na poligonu u razdoblju od 2002. do 2010. godine, za rekonstrukciju je korišten različiti broj EOF modova (obojene površine). Prvih devet modova objašnjava 86.6 % varijabilnosti. Crne isprekidane linije označavaju izohipse planina svakih 50 m, s početnom visinom od 270 m

Utjecaj orografije na pojavu, intenzitet i prostornu raspodjelu tuče potvrđuju i položaji slučajeva tuče većeg intenziteta (H3 – H5) izmjerenog po Torro-ljestvici u središnjem i istočnom dijelu Hrvatske. Zbog boljeg prostornog prikaza korišteni su kvadranti dimenzija 9 km x 9 km (Počakal, 2003b). Na slici 23. može se vidjeti da se najveći broj slučajeva tuče većeg intenziteta nalazi u središnjem dijelu Hrvatske ispred planina Bilogore i Moslavačke gore, a samo se manji broj nalazi u graničnom području. Tako je i dosad najveći zabilježeni slučaj tuče u promatranom razdoblju izmjeren s K.E. od $1\,359.6\text{ J m}^{-2}$ (H5) i maksimalnim promjerom zrna tuče od 34.4 mm (H5), na području ispred planine (Papuk) u kvadrantu K09. Iz radarskih podataka sa RC Bilogora može se vidjeti da dolazeći iz pravca sjeveroistoka Cb ćelija stagnira ispred planine Papuk i daje tuču u trajanju od 20 minuta, 21. kolovoza 2004. godine, od 18:05 do 18:25 sati. Ove podatke potvrđuje i godišnji prostorni prikaz položaja kvadranta na kojima je zabilježen veći udio slučajeva tuče s velikom štetom (tablica 11; sl.

24.), gdje se može dobro vidjeti da se područja s velikom štetom u najvećem broju slučajeva nalaze u neposrednoj blizini planina.



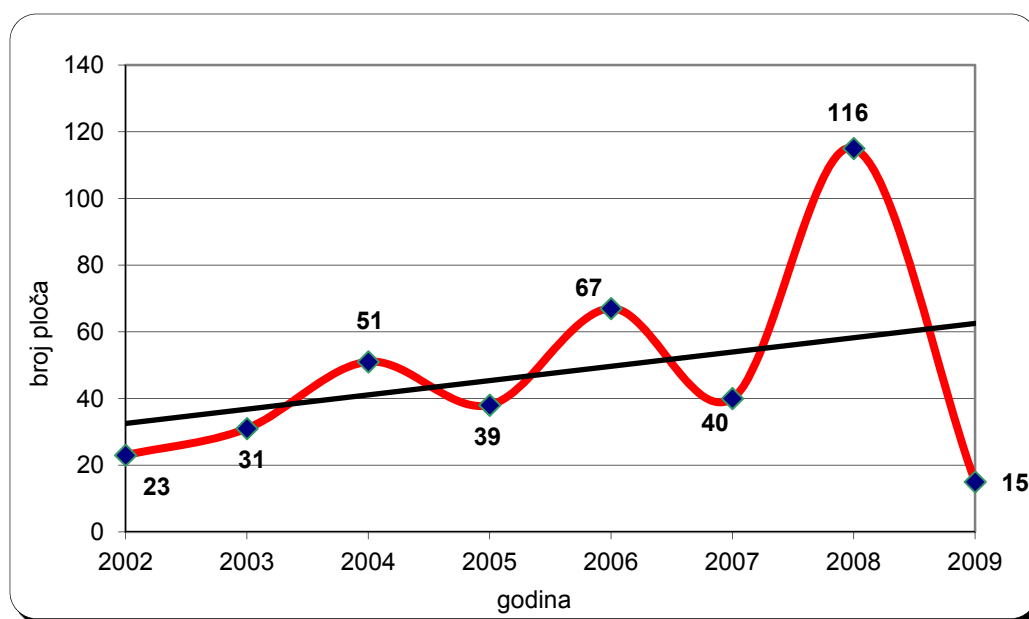
Slika 23. Prostorna raspodjela kinetičke energije (J m^{-2}) slučajeva pojave tuče velikog intenziteta (H3-H5) koristeći Torro skalu (2002.-2009.). Kvadranti (9 km x 9 km) označeni su slovima od A do R i brojkama od 3 do 13



Slika 24. Prostorna raspodjela kvadranta s većim udjelom (5-100 %) broja slučajeva tuče s velikom štetom na biljnim kulturama (50-100 %) u odnosu na ukupni broj slučajeva tuče

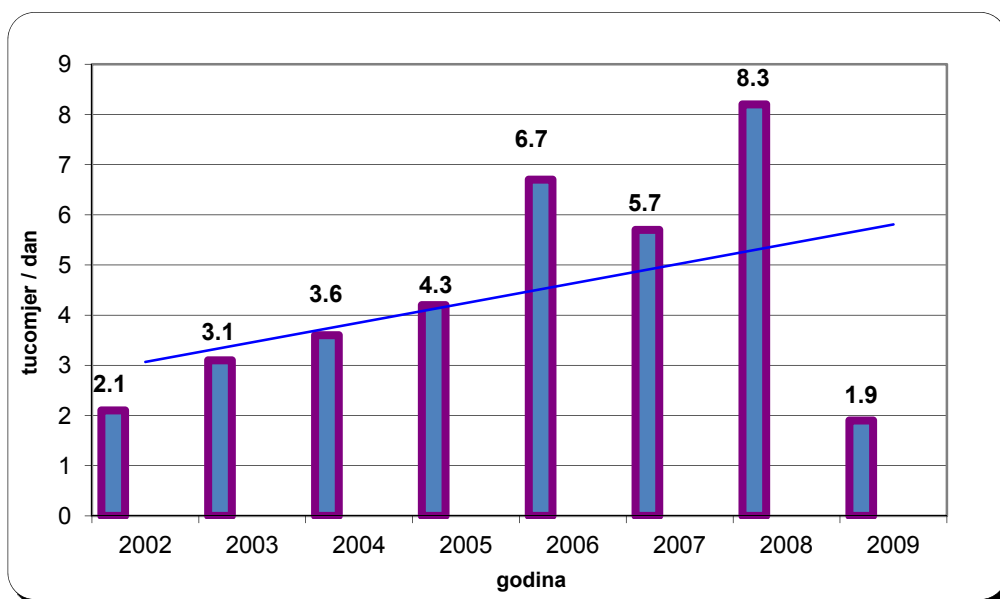
4.4. Broj dana i površina zahvaćena tučom na poligonu

Na poligonu s površinom od 600 km^2 zabilježeno je u razdoblju 2002. do 2009. godine prosječno 10.4 dana s tučom u sezoni. Broj dana s tučom u tom razdoblju kretao se između 7 i 14. Dok se broj dana s tučom na poligonu relativno malo mijenjao, to se ne može reći za broj oštećenih ploča u sezoni. Prosječni broj oštećenih ploča tučomjera u promatranom razdoblju iznosi 47.5. Uzevši u obzir da jedan tučomjer predstavlja površinu od 4 km^2 , prosječna (hipotetička) veličina tučene površine na poligonu iznosila je 190 km^2 . Promatrajući pojedinačno broj oštećenih ploča po godinama, vidi se pozitivni trend od 2002. (23 ploče) pa do 2008. godine, kad je zabilježen dosadašnji rekordni broj oštećenih ploča (116). Najmanji zabilježeni broj oštećenih ploča tučomjera (15) bio je 2009. godine (sl. 25.). Porast inteziteta,



Slika 25. Godišnji broj oštećenih ploča tučomjera i trend na poligonu u razdoblju od 2002. do 2009. godine

a time i dimenzija tučonosnih oblaka iznad poligona, može se vidjeti i u prosječnom broju oštećenih ploča tučomjera po danu padanja tuče, kao i povećanje površine tučom zahvaćenog područja. U 2002. godini prosječno je oštećen 2.1 tučomjer (8.4 km^2), da bi taj broj u 2008. godini iznosio rekordnih 8.3 tučomjera (33.2 km^2). U 2009. godini praktično nije bilo nikakve veće grmljavinske aktivnosti na širem području poligona i samo je 1.9 tučomjera bilo



Slika 26. Prosječni broj oštećenih ploča tučomjera za dan s tučom na poligonu u razdoblju od 2002. do 2009. godine

oštećeno po danu s tučom, a i same srednje vrijednosti K.E. u toj godini bile su minimalne (tablica 13; sl. 26.).

Rezultati dobiveni u ovom i prethodnom poglavlju ukazuju na jak utjecaj orografije na razvoj, intenziviranje i gibanje Cb ćelija na području Hrvatske. Taj utjecaj se vidi u većoj čestini, većoj K.E. i dužem trajanju padanju tuče u područjima uz planine. Analiza svih dobivenih rezultata pokazuje na porast intenziteta grmljavinskih oluja u Hrvatskoj. Da bi se moglo utvrditi da li je povećanje intenziteta grmljavinskih oluja u Hrvatskoj posljedica promjene globalne klime, ili samo varijabilnost lokalne klime (interna ili antropogena), potrebno je provesti analizu dužeg vremenskog niza podataka. U nastavku rada analizirani su određeni slučajevi grmljavinskih nevremena s tučom iznad poligona.

4.5. Analiza grmljavinskog nevremena i parametara tuče na području poligona za dane 17. lipnja, 7. i 14. srpnja 2008. godine

Detaljna analiza izmjerenih fizičkih parametara tuče na tlu, prikazana je za tri odabrana slučaja kada se grmljavinsko nevrijeme nalazilo iznad poligona. Grmljavinska nevremena izabrana su prema različitim vremenima prolaska iznad poligona. U prvom primjeru analizirani su podaci za dan 17. lipnja 2008. godine, kada je grmljavinska ćelija prelazila preko poligona u vremenskom intervalu između 16 i 18 sati centralnog Europskog vremena (CET). To je vremenski interval u kojem pada najviše tuče i nastaje najviše štete u kontinentalnom dijelu Hrvatske (Počakal i sur., 2009). Dan 7. srpnja 2008. godine uzet je za analizu padanja tuče na poligonu u noći između 21:30 i 22:30 sati, a u grmljavinskom nevremenu dana 14. srpnja 2008. tuča je na poligonu padala ujutro i to između 7:30 i 8:20 sati. U ovim primjerima grmljavinskog nevremena s tučom detaljno su analizirane karakteristike i fizički parametri zrna tuče na tlu.

Kod analize i prikaza parametara karakterističnih za određeni dan s grmljavinskim nevremenom i tučom korišteni su sljedeći podaci:

- a) Vremenska prognoza za potrebe Odjela obrane od tuče (Odjel za vremenske analize i prognoze DHMZ-a)
- b) Sinoptičke karte (karta prizemnog tlaka zraka i visinska karta na 850 hPa nad Evropom (Europäischer Wetterbericht, Deutsche Wetterdienst)
- c) Indeksi nestabilnosti dobiveni na osnovi radiosondažnog mjerenja na GMP Zagreb - Maksimir

c1) Indeks podizanja, (LI) - *Lifted index* (npr. Bluestein, 2007)

Indeks podizanja LI, definiran je kao razlika između stvarne temperature na visini na kojoj je tlak 500 hPa (T_{500}) i temperature koju bi čest imala kada bi s početnog tlaka p i početne temperature T , adijabatički došla na tlak od 500 hPa ($T_{\text{čest}500}$):

$$LI = T_{500} - T_{\text{čest}500} \text{ (K)} \quad (17)$$

Pozitivne vrijednosti odražavaju stabilne, a negativne vrijednosti nestabilne uvjete (tablica 14.a).

Tablica 14.a Vrijednosti indeksa podizanja (LI) za različite uvjete u atmosferi za razvoj slobodne konvekcije (npr. Bluestein, 2007)

LI iznad 0	stabilno, ali postoji mogućnost za slabu konvekciju za LI = 1 – 3 uz prisutno jako dizanje
LI = 0 do -3	granično nestabilno
LI = -3 do -6	umjereno nestabilno
LI = -6 do -9	jako nestabilno
LI ispod -9	ekstremno nestabilno

c2) Konvektivna raspoloživa potencijalna energija, (CAPE) - *Convective Available Potential Energy* (npr. Holton, 2004). Konvektivna raspoloživa potencijalna energija CAPE, osnovna je mjera nestabilnosti, a ovisi o temperaturi česti u odnosu na okolni zrak. Definira se kao

$$CAPE = g \int_{z_{LFC}}^{z_{LNB}} \left(\frac{T_{VP} - T_{VE}}{T_{VE}} \right) dz \quad (18)$$

pri čemu je g ubrzanje sile teže, Z_{LFC} visina razine slobodne konvekcije (LFC), Z_{LNB} visina razine neutralnog uzgona (LNB), a T_{VP} i T_{VE} virtualne temperature česti, odnosno okolnog zraka (tablica 14.b). CAPE se vrlo često koristi kao pokazatelj mogućnosti nastanka konvektivne aktivnosti u atmosferi (npr. Grisogono i Belušić, 2008).

Tablica 14.b Vrijednosti CAPE-a ($J\ kg^{-1}$) za različite uvjete u atmosferi za razvoj slobodne konvekcije (npr. Holton, 2004)

CAPE < 0	stabilno
0 < CAPE < 1000	nestabilno
1000 < CAPE < 2500	vrlo nestabilno
2500 < CAPE < 3500	jako nestabilno
CAPE > 3500	ekstremno nestabilno

c3) Integralni Richardsonov broj, (BRN) - *Bulk Richardson number* (npr. Holton, 2004)

BRN je dobar dinamički indikator tipova konvektivne oluje za određeno područje. On uključuje CAPE i ukupno vertikalno smicanje horizontalnog vjetrova u donjem 0 - 6 km sloju troposfere (npr. Holton, 2004):

$$BRN = CAPE / (0,5 U^2), \quad (19)$$

gdje je U mjera ukupnog vertikalnog smicanja vjetrova. BRN je bezdimenzijski broj i mora biti veći od 10 da bi došlo do razvoja oluje (tablica 14.c).

Tablica 14.c Vrijednosti integralnog Richardsonovog broja (BRN) za različite uvjete u atmosferi i razvoj oluja (npr. Holton, 2004)

BRN < 10	Jako vertikalno smicanje vjetrova i slab CAPE. Ovo smicanje bi moglo biti prejako za slabi vertikalni uzgon da bi došlo do razvoja jakih konvektivnih uzlaznih struja. Međutim, uz dovoljno forsiranje može doći do razvoja oluje.
10 < BRN < 45	Povezan s razvojem superćelijskih oluja.
BRN > 50	Relativno slabo vertikalno smicanje i visok CAPE, što upućuje na to da je moguć razvoj višćelijske oluje.

Intervali vrijednosti indeksa nestabilnosti za GMP Maksimir prikazani su u tablicama 14. a, b i c.

d) Korigirane vrijednosti CAPE-a za područje Zagorja izračunate na osnovi operativnog numeričkog modela Aladin/HR. Metoda se temelji na zamjeni podataka prizemnog sloja dobivenog pomoću modela (temperatura, tlak i specifična vlaga) s podacima izmjerenim na meteorološkim postajama (sl. 29., 38. i 45; Kovačić, 2005).

e) Radarske slike izmjerene pomoću digitalnog radara MER 93S s Radarskog centra Varaždin

e1) horizontalni- prostorni presjek (PPI- *plan position indicator*)

e2) vertikalni presjek (RHI- *range height indicator*)

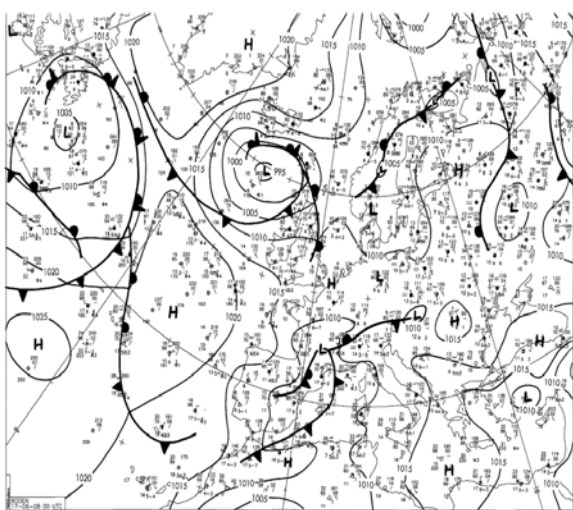
g) Fizički parametri zrna tuče izmjereni pomoću tučomjera

4.5.1. Slučaj grmljavinskog nevremena 17. lipnja 2008. godine

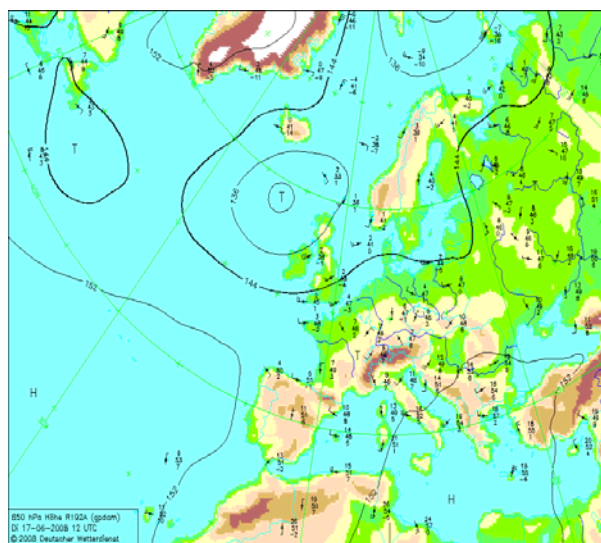
Opis sinoptičke situacije (DHMZ/ Odjel za vremenske analize i prognoze, 2008).

„Plitka ciklona i atmosferska fronta nalaze se zapadno od Hrvatske i brzo se približavaju našem području (sl. 27.a), dok u visinskoj dolini smještenoj zapadnije od naših krajeva pritječe nestabilan zrak s jugozapada (sl. 27.b). Vremenska prognoza za 17. lipnja 2008. od 8 do 20 sati predviđa promjenljivo oblačno sa sunčanim razdobljima, sredinom dana i poslijepodne mjestimice kratkotrajnu kišu i lokalne pljuskove s grmljavinom, najprije u zapadnim krajevima. Navečer jači porast naoblake uz mogućnost za izraženije pljuskove s grmljavinom, osobito noću. Vjetar slab do umjeren jugozapadni. Vjerojatnost pojave grmljavine je velika, dok je vjerojatnost za pojavu tuče umjerena. Prognoza početka izrazite nestabilnosti a onda i konvektivnog procesa je za sredinu dana, najprije u zapadnim krajevima, na područjima radarskih centara RC-1 Sljeme, RC-2 Varaždin i RC-2B Trema, tj. na području poligona“.

a)



b)

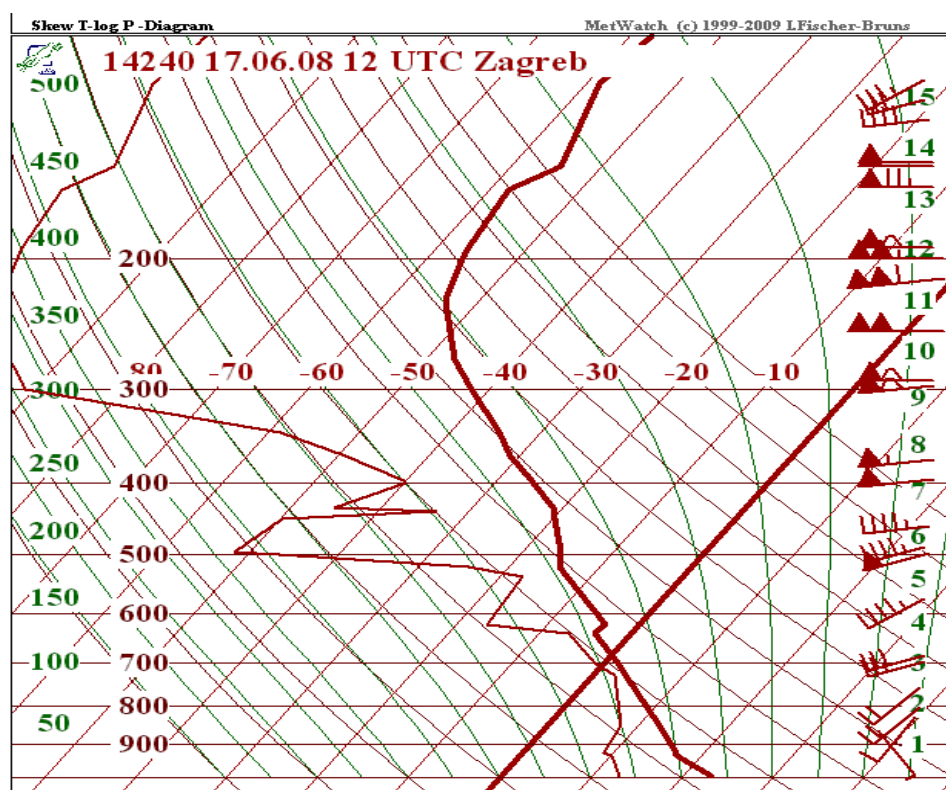


Slika 27. a) Karta prizemnog tlaka nad Europom u 00 UTC (01 CET); b) Visinska karta na 850 hPa nad Europom u 12 UTC (13 CET), 17. lipnja 2008. godine (Europäischer Wetterbericht, Deutsche Wetterdienst, 2008)

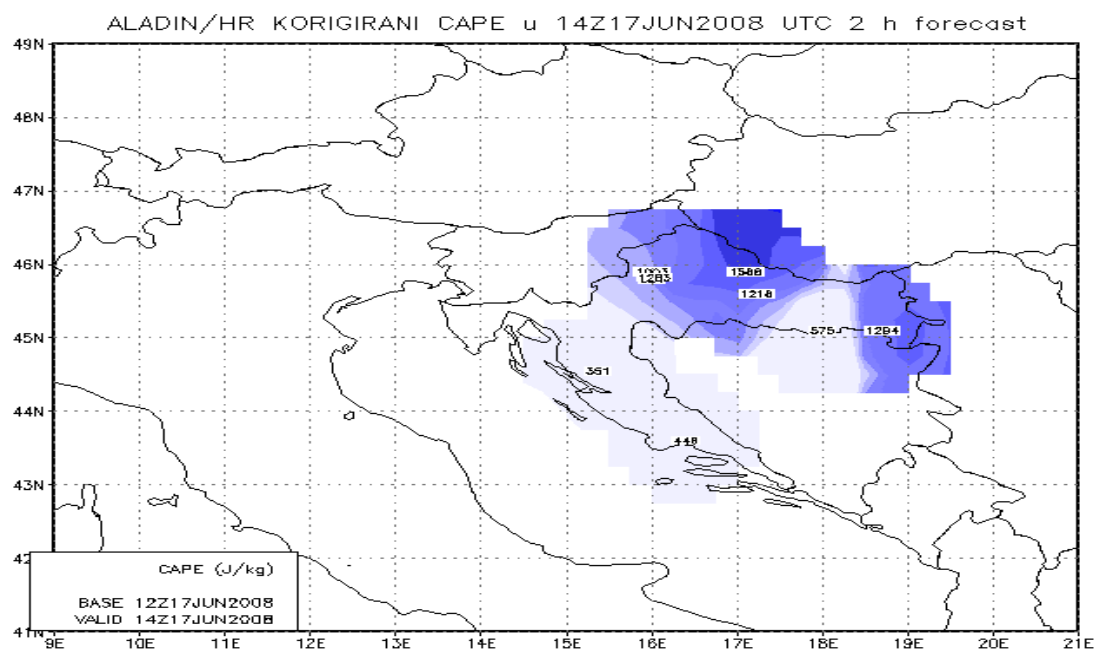
Termodinamički uvjeti za razvoj konvekcije (tablica 14. a-c) određeni na temelju sondaže na GMP Zagreb-Maksimir (sl. 28.) bili su razmjerno nepovoljni (mali), što nije ukazivalo na jači intenzitet grmljavinskog nevremena. Indeksi nestabilnosti bili su: $LI = -1.0$; $CAPE = 109.7 \text{ J kg}^{-1}$ i $BRN = 1.2$. Daleko veće vrijednosti CAPE-a (1003 J kg^{-1}) dobivene su za

područje Zagorja (sl. 29.) korištenjem operativnog numeričkog modela Aladin/HR (Kovačić, 2005). Ovom metodom dobivene vrijednosti CAPE-a (vrlo nestabilno) su se pokazale dobrim indikatorom nestabilnosti za područje Zagorja, u odnosu na dobivene indekse nestabilnosti izračunate na osnovi podataka radio sondažnog mjerenja na GMP Zagreb-Maksimir. Radarsko praćenje formirane grmljavinske ćelije sa RC Varaždin, čija je izmjerena prosječna visina iznosila oko 9 km, a promjer oko 10 km, počelo je u 15:57 sati još na području Slovenije. Krećući se u smjeru zapad – istok, u 16:40 sati grmljavinska ćelija dolazi iznad zapadnog ruba poligona kada tučomjerna mjesta F01 i F02 registriraju tuču u trajanju od oko 15 minuta. Primjer radarske slike (PPI i RHI) grmljavinske ćelija iznad poligona za dan 17. lipnja 2008. godine prikazan je na slici 30.

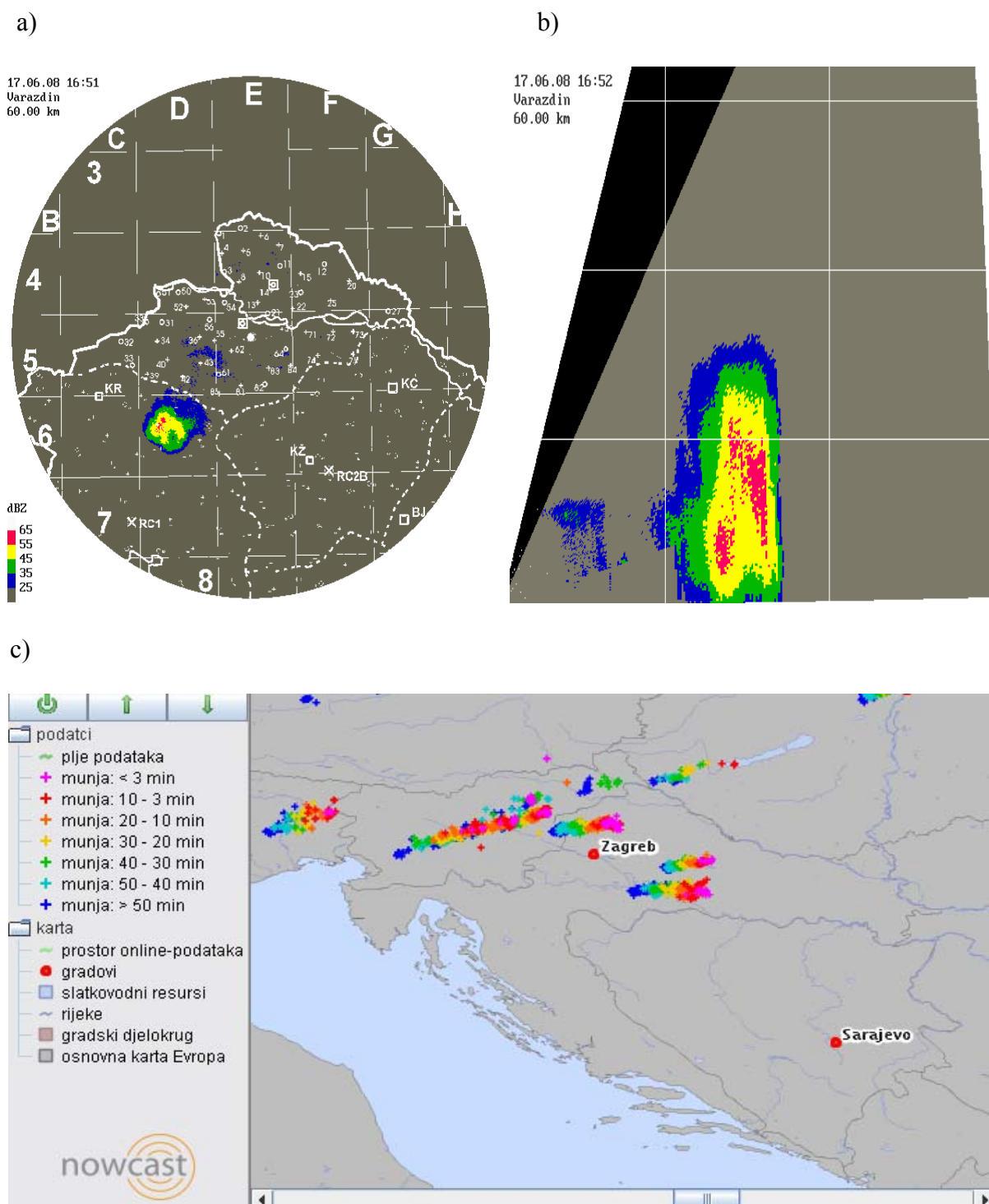
Prolazeći iznad poligona, grmljavinska ćelija kontinuirano daje tuču sve do 17:25 (tučomjer D17) sati kada napušta područje poligona. Kontinuirani trag tuče različitog intenziteta dužine 30 km zabilježen je na 39 tučomjernih mjesta. Dva tučomjerna mjesta (D04 i B06) javila su pojavu tuče, ali nisu dostavila ploče tučomjera na analizu. Iz prostornog prikaza histograma veličina zrna tuče (sl. 31.) i K.E. (sl. 32.) za svaki tučomjer, vidi se da se položaji tučomjera, koji su zabilježili zrna tuče velikog promjera i K.E., nalaze u sredini kontinuiranog traga tuče na poligonu. Do te horizontalne raspodjele većih zrna tuče bliže osi silazne struje u pravcu vjetra dolazi na osnovu njihovih različitih konačnih brzina padanja (sl. 33). Širina silazne struje bila je oko 8 km, što je nekoliko puta veće od srednje širine silazne struje od 1.2 km (Cotton i Anthes, 1989), što dodatno ukazuje na intenzitet ove ćelije. Najveće zrno od 22.4 mm izmjereno je uz K.E. od 278.2 J m^{-2} na tučomjeru s oznakama C15, dok je najveća K.E. od 284.4 J m^{-2} zabilježena na tučomjeru E03. Na histogramu tučomjera E03 veličina zrna tuče (sl. 31.) može se vidjeti velika sličnost s histogramom tučomjera C15. Najveći broj zrna tuče (3296 m^{-2}) izmjereno je na tučomjeru C08. Prosječne vrijednosti parametara tuče na poligonu, izračunate na osnovu podataka dobivenih s 37 ploča tučomjera, iznosile su: broj zrna = 1325 m^{-2} , K.E. = 83.1 J m^{-2} , masa (po jedinici površine) = 1050.8 g m^{-2} , maksimalni promjer zrna tuče = 15.9 mm i vrijeme trajanja padanja = 10.1 min.



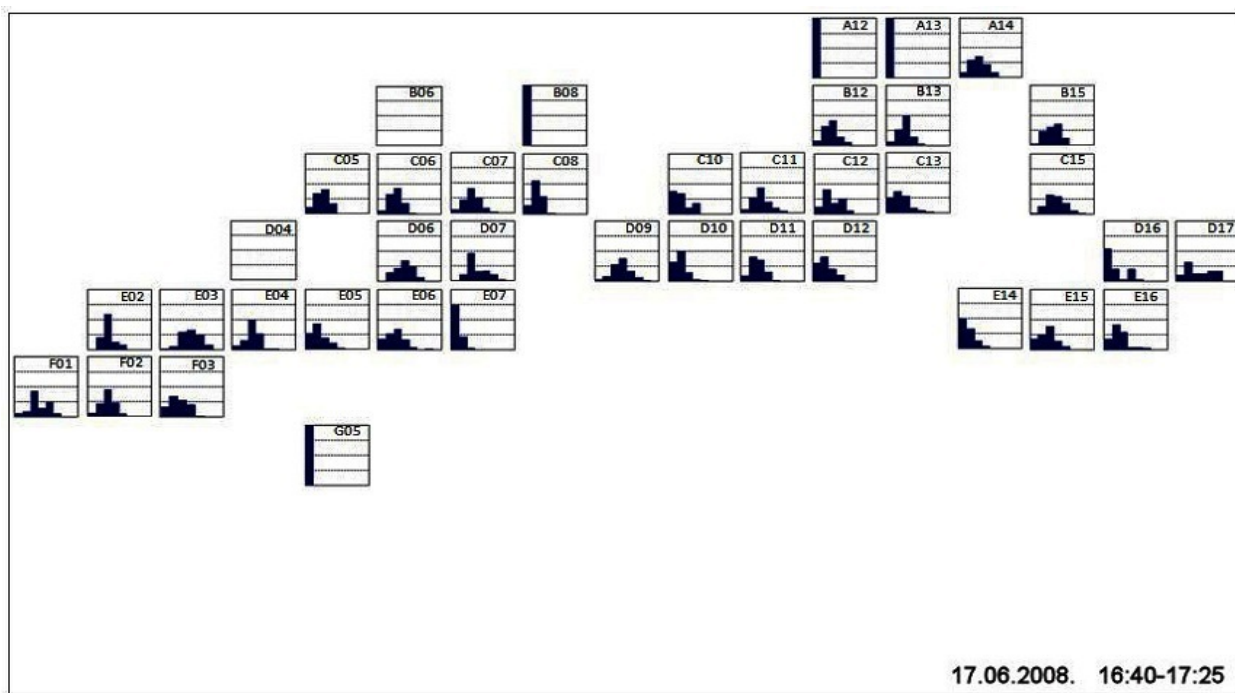
Slika 28. Radiosondažna mjerenja smjera i brzine vjeta, temperature i rosišta na GMP Zagreb-Maksimir za 17. lipnja 2008. godine, 12 UTC (DHMZ, 2008)



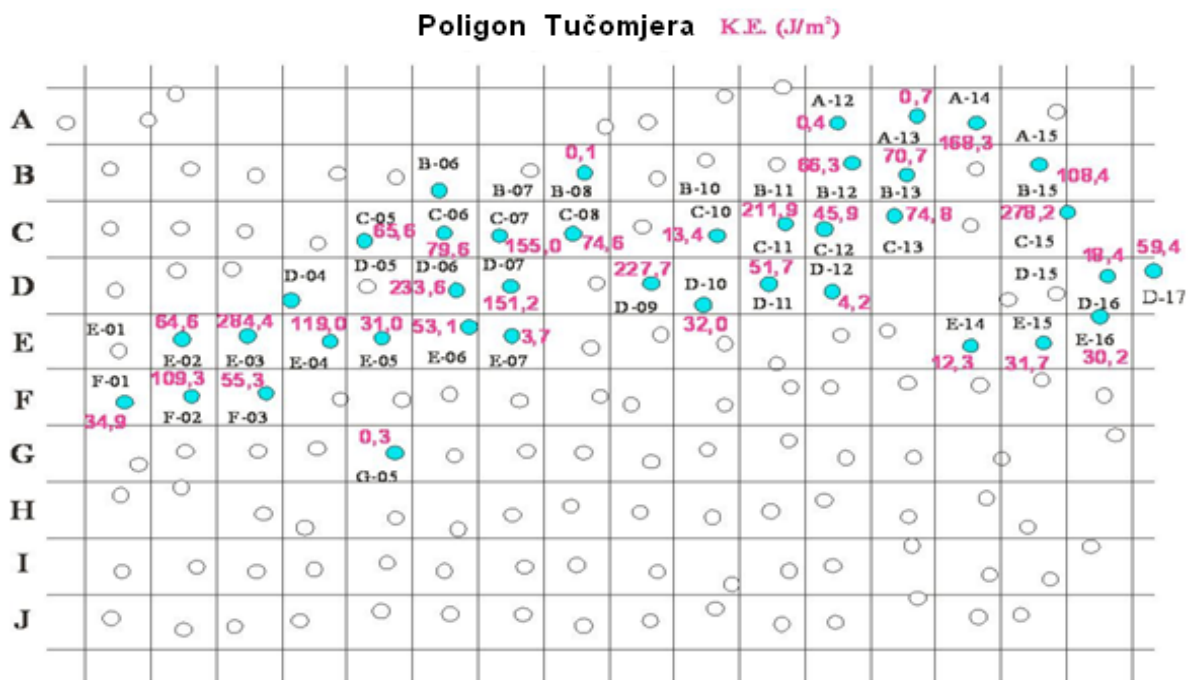
Slika 29. Prostorna raspodjela raspoložive konvektivne potencijalne energije CAPE za 17. lipnja 2008. godine prema podacima prognostičkog numeričkog modela Aladin/HR uz korekciju prizemnih podataka modela s podacima mjerenja (Kovačić, 2005)



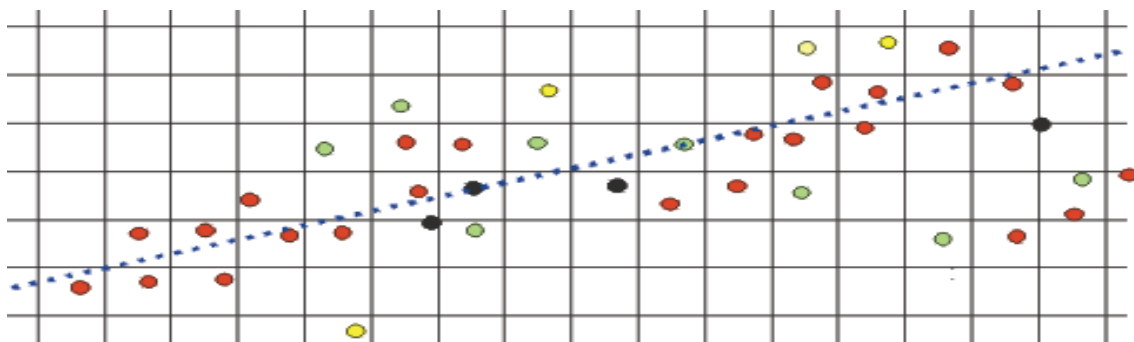
Slika 30. Višećelijski Cb izmjeren radarom MER 93S, 17. lipnja 2008. godine iznad poligona na RC Varaždin u radnom dometu od 60 km, a) prostorni prikaz (PPI) oblačne ćelije iznad poligona u 16:51, b) vertikalni prikaz (RHI) Cb ćelije u 16:52 (horizontalne linije označavaju interval od 5 km, a vertikalne od 20 km), c) električna pražnjenja od 16:00 do 17:00 CET



Slika 31. Prostorna raspodjela i histogram veličina zrna tuče za svaki tučomjer na poligonu za slučaj padanja tuče 17. lipnja 2008. godine. Vertikalna ljestvica podijeljena je na četiri intervala (25%) i prikazuje relativne (0-100 %) čestine broja zrna tuče, a horizontalna os prikazuje promjere zrna tuče u intervalima od 2.5 mm s početnom vrijednošću od 5 do 35 mm. Prazni kvadranti označavaju položaj tučomjera s pojavom tuče, ali bez izmjerenih parametara zrna tuče



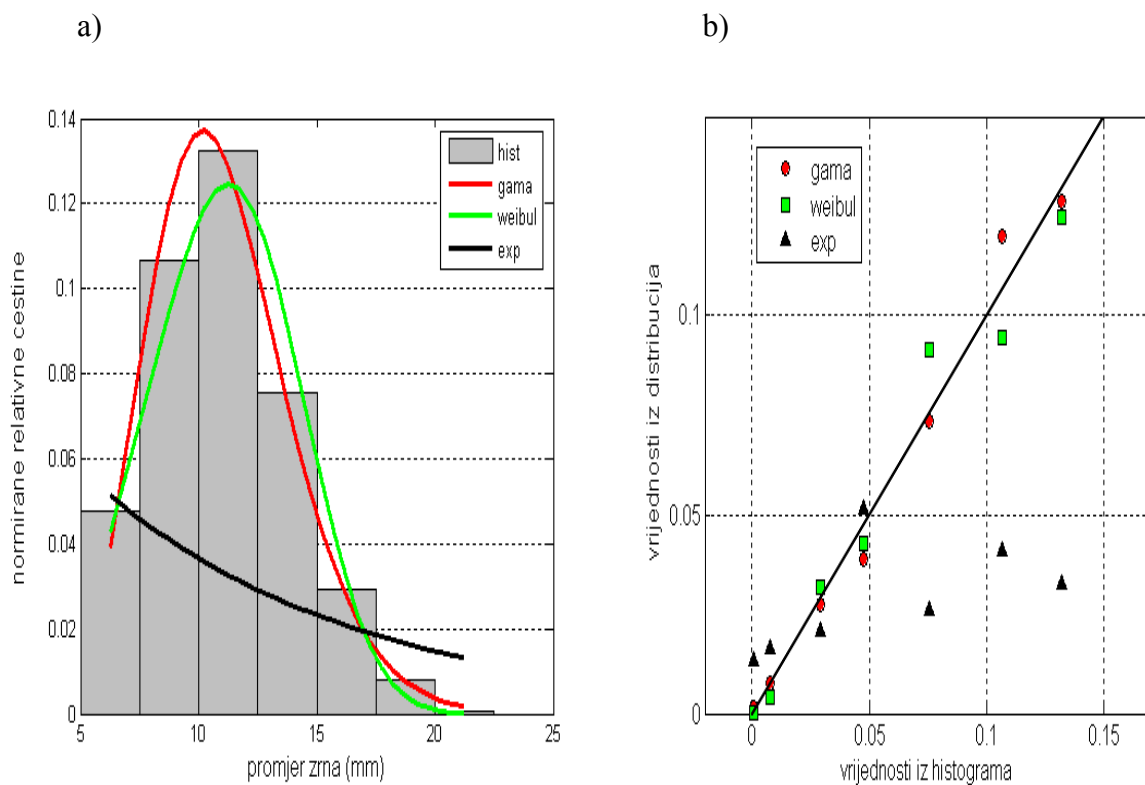
Slika 32. Prostorna raspodjela K.E. (J m^{-2}) za svaki tučomjer na poligonu za slučaj padanja tuče 17. lipnja 2008. godine



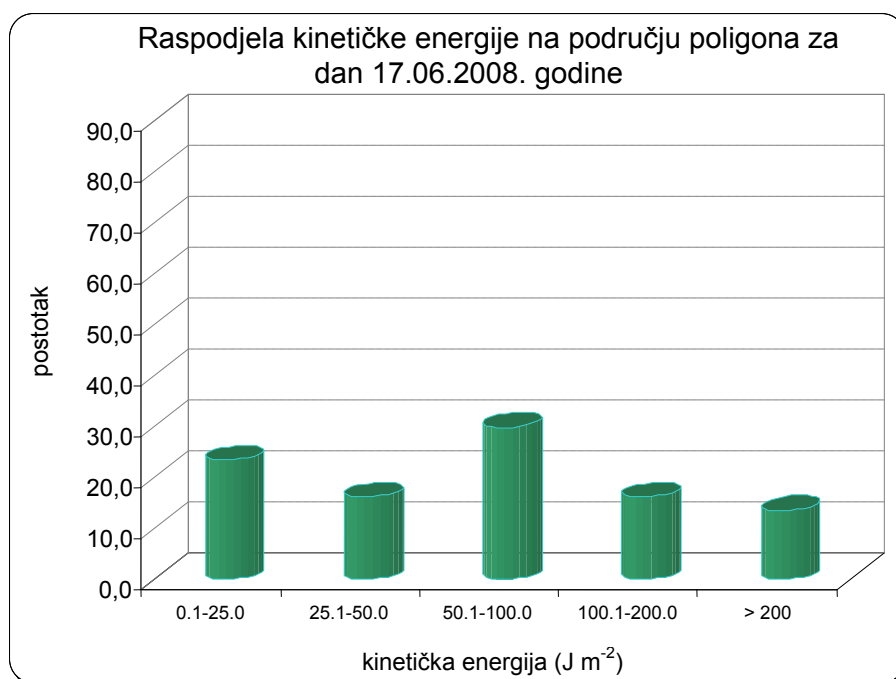
Slika 33. Raspodjela maksimalnih promjera zrna tuče unutar traga tuče na poligonu za dan 17. lipnja 2008. godine. (žuto 5-10 mm; zeleno 10-15 mm; crveno 15-20 mm i crno 20-25 mm)

Pomoću programa „Matlab“ upotrebom metode najmanje sume kvadrata izvršene su prilagodbe (*fit*) eksponencijalne, gama i Weibul (npr. Jeromel i sur., 2009) funkcija na histogram veličina zrna tuče za ukupni trag tuče izmjeren na poligonu dana 17. lipnja 2008. godine (sl. 34.a). Nadalje, izvršena je kvalitativna ocjena uspješnosti prilagodbe svake funkcije, izračunavanjem kvadrata koeficijenta korelacije R^2 . Dobiveno je da gama funkcija daje najbolju prilagodbu distribucije zrna tuče ($R^2_{\text{gama}} = 0.9822$). Vrijednost koeficijenta korelacije za Weibul funkciju je nešto manja ($R^2_{\text{Weibul}} = 0.9682$), dok je koeficijent korelacije za eksponencijalnu funkciju negativan ($R^2_{\text{exp.}} = 0.2509$). Uspješnost prilagodbe vidi se na slici (sl. 34.b).

Kako bi se utvrdio intenzitet grmljavinskog nevremena s tučom iznad poligona, radi moguće usporedbe s intenzitetom drugih grmljavinskih nevremena s tučom, izračunata je K.E.G (16) i ukupna površina traga tuče izmjerenog na poligonu za 17. lipnja 2008. godine. Ukupna globalna K.E.G je velika i iznosi $12\,292.8 \cdot 10^6$ J, na ukupnoj površini zahvaćenoj tučom od 156 km^2 . To je dosad najveća zabilježena K.E.G na poligonu u cijelom promatranom razdoblju. Raspodjela K.E. pokazuje da je najveći broj slučajeva tuče bio u intervalu od 50.1 do 100 J m^{-2} (sl. 35.). Na veliki intenzitet tuče ukazuju i podaci o udjelu tuče s K.E. u intervalu od 100.1 – 200 (12 %) i udjelom (10 %) K.E. većom od 200 J m^{-2} .



Sl. 34. a) Normirani histogram promjera zrna tuče za 17. lipanj 2008. godine i prilagođene eksponencijalne, gama i Weibull funkcije, b) Dijagram raspršenja normiranih relativnih čestina promjera zrna dobivenih prilagodbama u odnosu na mjerenja. Pravac predstavlja 1 : 1 omjer



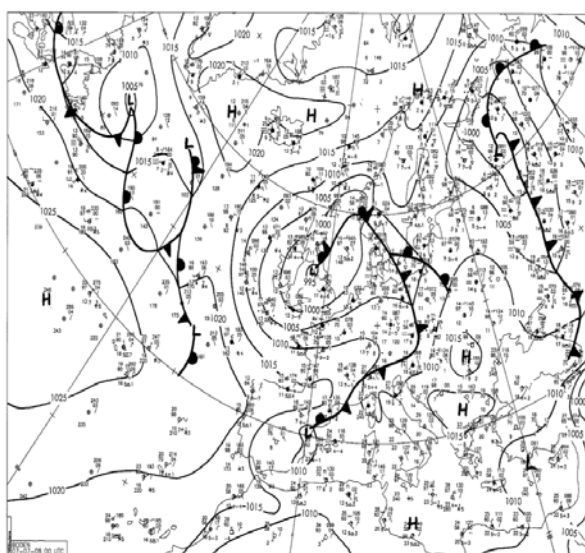
Slika 35. Raspodjela K.E. po intervalima mogućeg oštećenja za 17. lipanj 2008. godine na poligonu (tablica 11.)

4.5.2. Slučaj grmljavinskog nevremena 7. srpnja 2008. godine

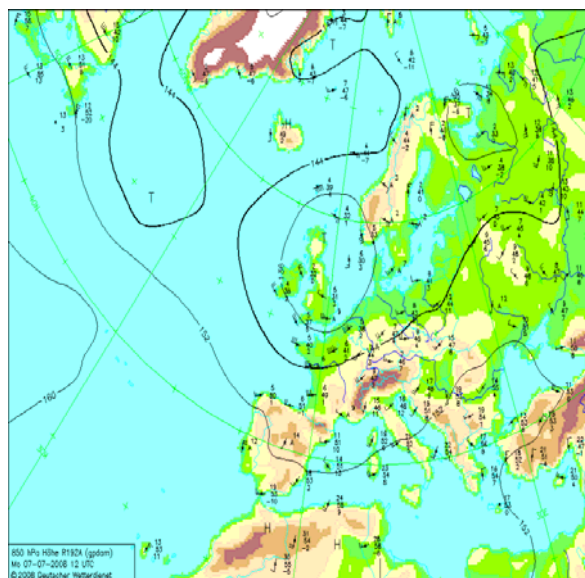
Opis sinoptičke situacije (DHMZ/ Odjel za vremenske analize i prognoze, 2008).

„Nad zapadnom Europom nalazi se središte prostrane ciklone. Frontalni poremećaj nalazi se sjeverozapadno od naših krajeva i preko kopnenog područja Hrvatske premještati će se sljedeće noći i drugi dan ujutro (sl. 36.a). U naše područje dolazi po visini topliji i vlažniji zrak iz smjera jugozapada (sl. 36.b). Vremenska prognoza za 7. srpnja 2008. predviđala je od 8 do 20 sati pretežno sunčano vrijeme, dok je za poslijepodne najavila mogući mjestimice jači razvoj konvektivnih oblaka uz pljusak, grmljavinu, a postojali su uvjeti i za tuču. Jače naoblacenje, mjestimice uz jače nestabilnosti očekivalo se u noći, a u najistočnijim krajevima sljedeći dan ujutro. Od 20 sati navečer tog dana do 8 sati ujutro drugog dana prognoza je predviđala jači porast naoblake, a tijekom noći promjenljivo oblačno i nestabilno vrijeme s kišom te pljuskovima s grmljavinom. Mjestimice je moguća i obilnija oborina i jače grmljavinsko nevrijeme, ponajprije u Slavoniji. Vjerojatnost pojave grmljavine bila je velika, dok je vjerojatnost za pojavu tuče bila umjerena. Prognoza početka izrazite nestabilnosti a onda i konvektivnog procesa, poslijepodne i osobito u noći, na područjima radarskih centara RC-1 Sljeme, RC-2 Varaždin i RC-2B Trema, tj. na području poligona.“

a)



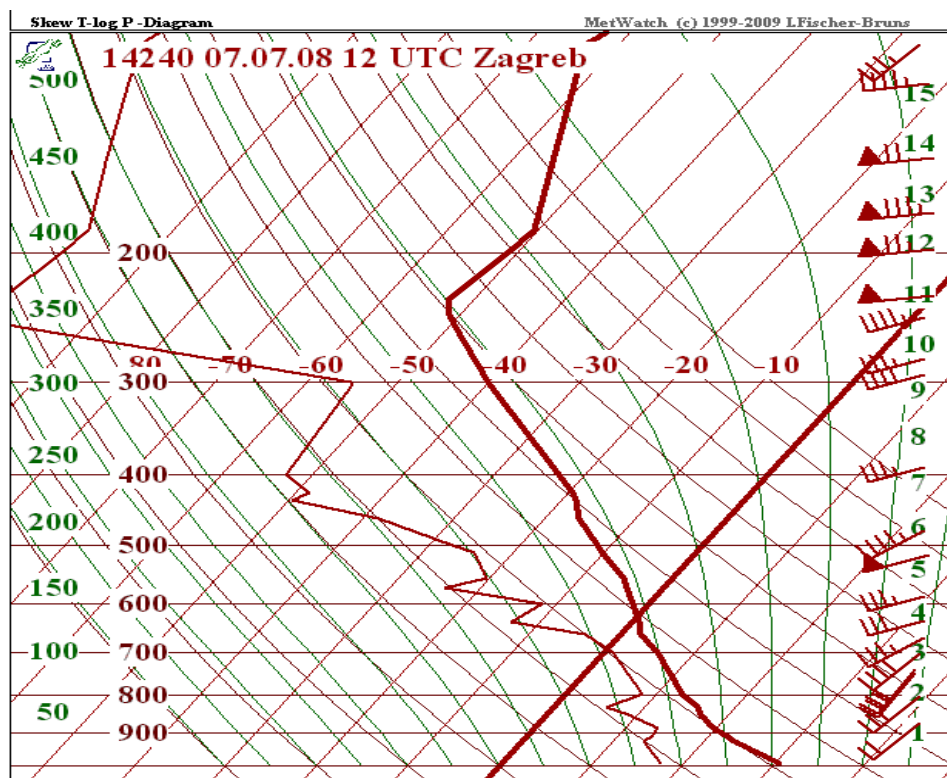
b)



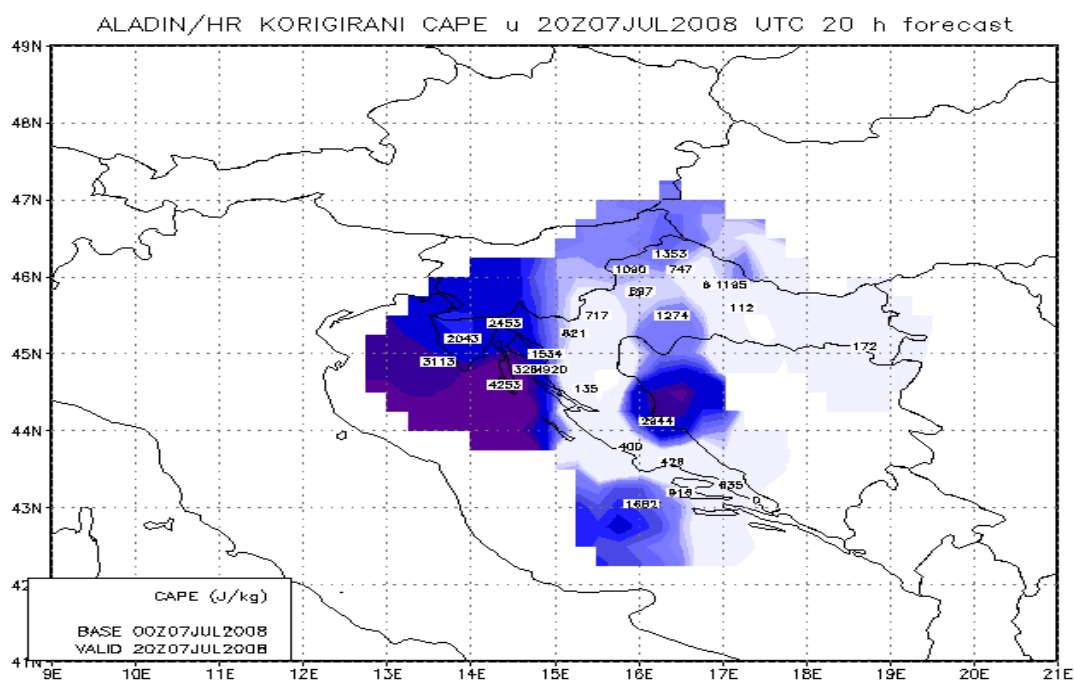
Slika 36. a) Karta prizemnog tlaka nad Europom u 00 UTC (01 CET); b) Visinska karta na 850 hPa nad Europom u 12 UTC (13 CET), 7. srpnja 2008. godine (Europäischer Wetterbericht, Deutsche Wetterdienst, 2008)

Termodinamički uvjeti za razvoj konvekcije (tablica 14.a-c) određeni na temelju sondaže na GMP Zagreb-Maksimir (sl. 37.) bili su povoljni, što je ukazivalo na mogućnost jačeg intenziteta grmljavinskog nevremena. Indeksi nestabilnosti bili su: $LI = -5.1$; $CAPE = 1\,594\text{ J kg}^{-1}$ i $BRN = 36.2$. Slične, ali nešto manje vrijednosti CAPE-a od $1\,090\text{ J kg}^{-1}$ dobivene su za područje Zagorja (sl. 38.) na temelju operativnog numeričkog modela Aladin/HR (Kovačić, 2005). Ovom metodom dobivene vrijednosti CAPE-a (vrlo nestabilno), poklapale su se s indeksima nestabilnosti izračunatim na osnovi podataka radiosondažnog mjerenja na postaji Zagreb-Maksimir.

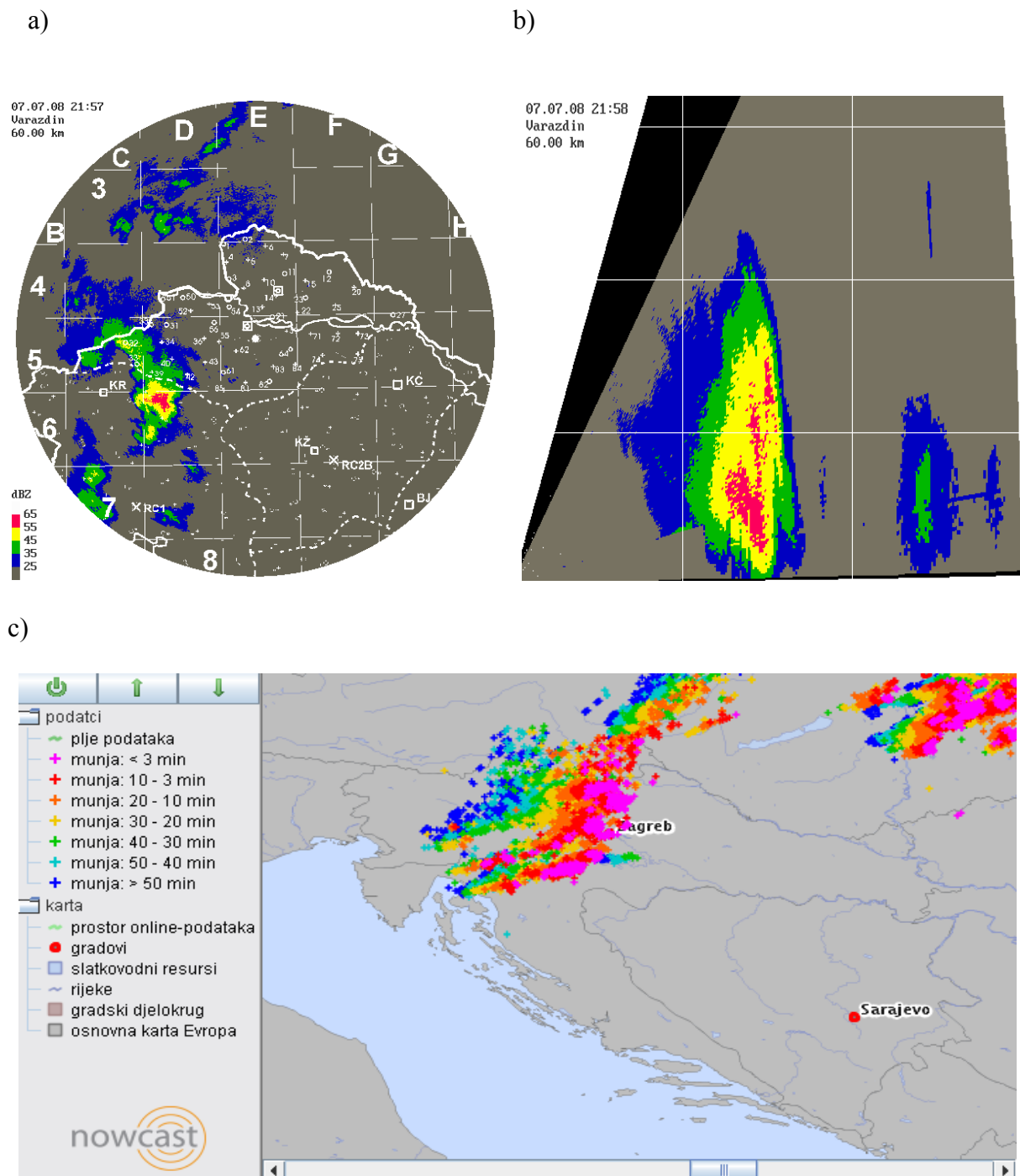
Dolazeći iz smjera Slovenije na područje poligona oko 21:40 sati, grmljavinska ćelija mjerena s RC Varaždin imala je promjer oko 10 km, dok je visina vrha grmljavinske ćelije prolazeći iznad poligona varirala između 8 i 12 km. Primjer radarske slike (PPI i RHI) grmljavinske ćelije iznad poligona za 7. srpnja 2008. godine, prikazan je na slici 39.a i b. Tuča koja je počela u 21:50 na tučomjeru C02 i trajala do 22:15 na tučomjeru D15 dala je kontinuirani trag (uz moguće manje prekide) dužine oko 24 km i širine od 4 do 6 km. Jedanaest tučomjernih mjesta zabilježilo je tuču, a mjerno mjesto B06 nije dostavilo ploču na analizu (sl. 40.). Iz prostornog prikaza histograma veličine zrna tuče i K.E. (sl. 41.) za svako tučomjerno mjesto vidi se da su nešto veća zrna, a time je izmjerena i veća K.E., padala u sredini (C07) s 42.1 J m^{-2} i pri kraju samog traga tuče (C12), koji je zabilježio i najveći iznos K.E. tog dana od 51.6 J m^{-2} . Iako su na nekim mjernim mjestima (sl. 40.) zabilježena zrna tuče veličine i do 21.5 mm, male iznose K.E. objašnjava mali broj zrna tuče koji je padao na jediničnu površinu unutar traga tuče. Tako je prosječni broj zrna tuče bio samo 400 m^{-2} . Ostale prosječne vrijednosti parametara tuče na poligonu iznosile su: K.E. = 16.4 J m^{-2} , masa (po jedinici površine) = 223.8 g m^{-2} , maksimalni promjer zrna tuče = 14.7 mm i vrijeme trajanja = 5.5 min.



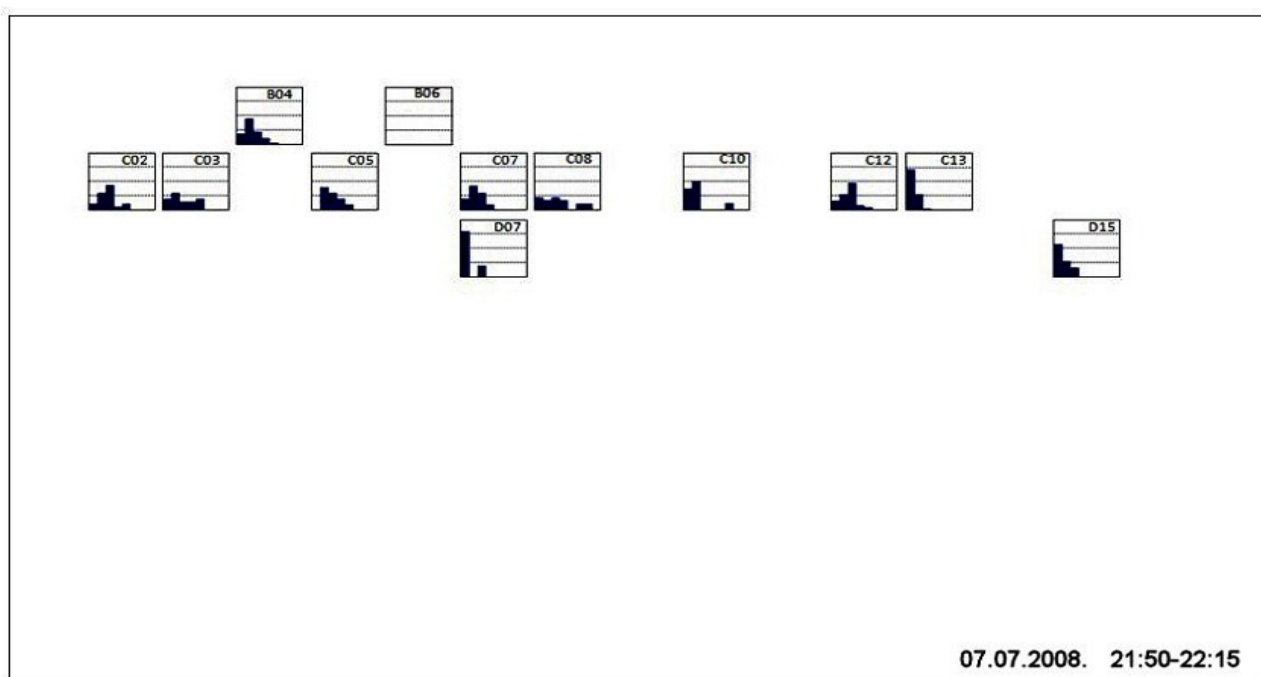
Slika. 37. Radiosondažna mjerenja smjera i brzine vjetrova, temperature i rosišta na GMP Zagreb-Maksimir za 7. srpanj 2008. godine (DHMZ, 2008)



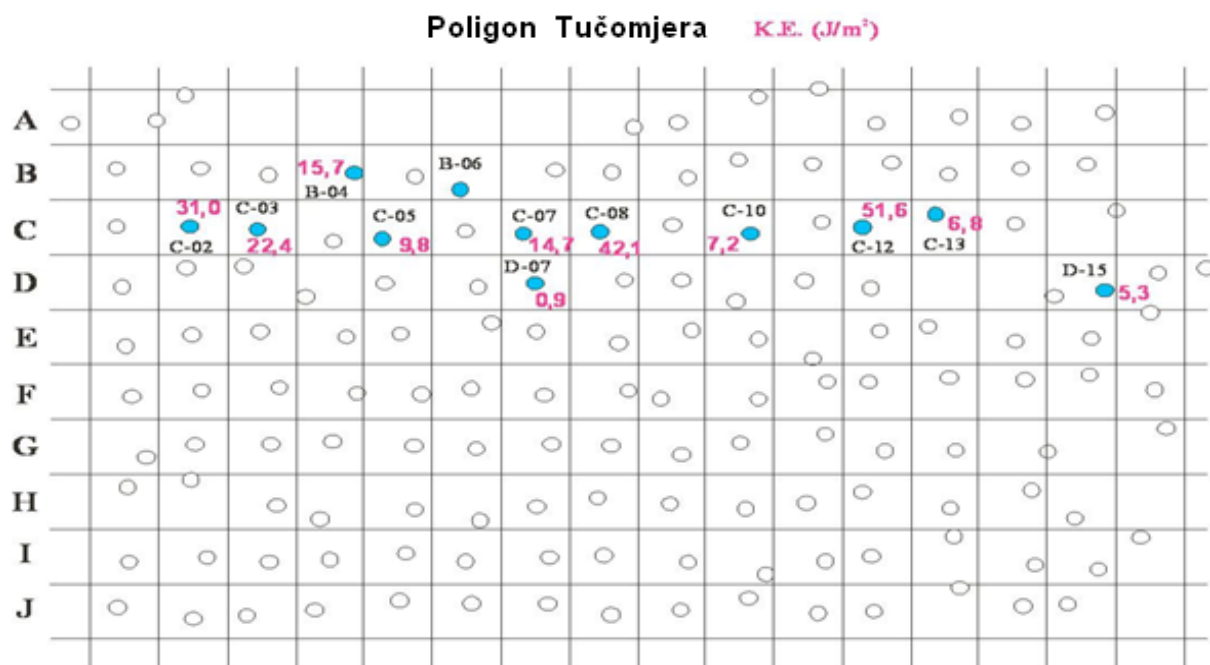
Slika 38. Prostorna raspodjela raspoložive konvektivne potencijalne energije CAPE za 7. srpanj 2008. godine prema podacima prognostičkog numeričkog modela Aladin/HR uz korekciju prizemnih podataka modela s podacima mjerenja (Kovačić, 2005)



Slika 39. Višećelijski Cb izmjeren radarom MER 93S, 7. srpanj 2008. godine iznad poligona na RC Varaždin u radnom dometu od 60 km, a) prostorni prikaz (PPI) oblačne ćelije iznad poligona u 21:57, b) vertikalni prikaz (RHI) Cb ćelije u 21:58. Horizontalne linije označavaju interval od 5 km, a vertikalne od 20 km, c) električna pražnjenja od 21:00 do 22:00 CET

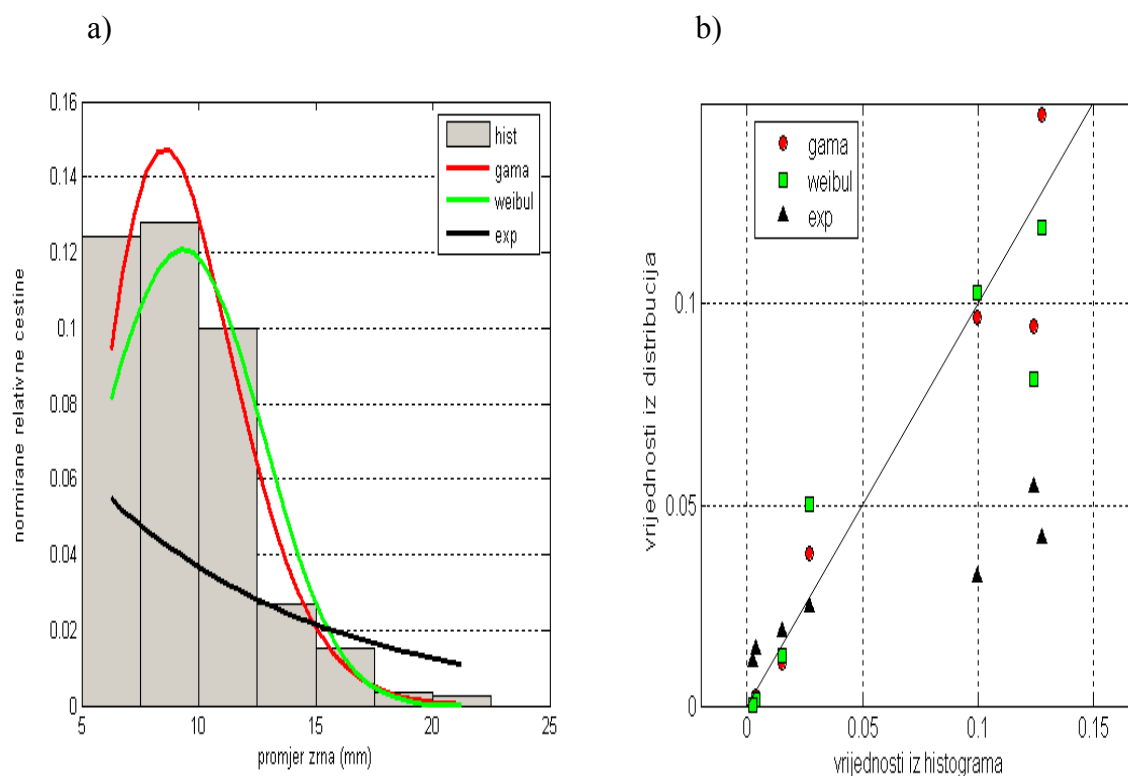


Slika 40. Prostorna raspodjela i histogram veličina zrna tuče za svaki tučomjer na poligonu za slučaj padanja tuče 7. srpnja 2008. godine. Vertikalna ljestvica podijeljena je na četiri intervala (25%) i prikazuje relativne (0-100 %) čestine broja zrna tuče, a horizontalna os prikazuje promjere zrna tuče u intervalima od 2.5 mm, s početnom vrijednošću od 5 do 35 mm. Prazni kvadranti označavaju položaj tučomjera s pojavom tuče ali bez izmjerenih parametara zrna tuče



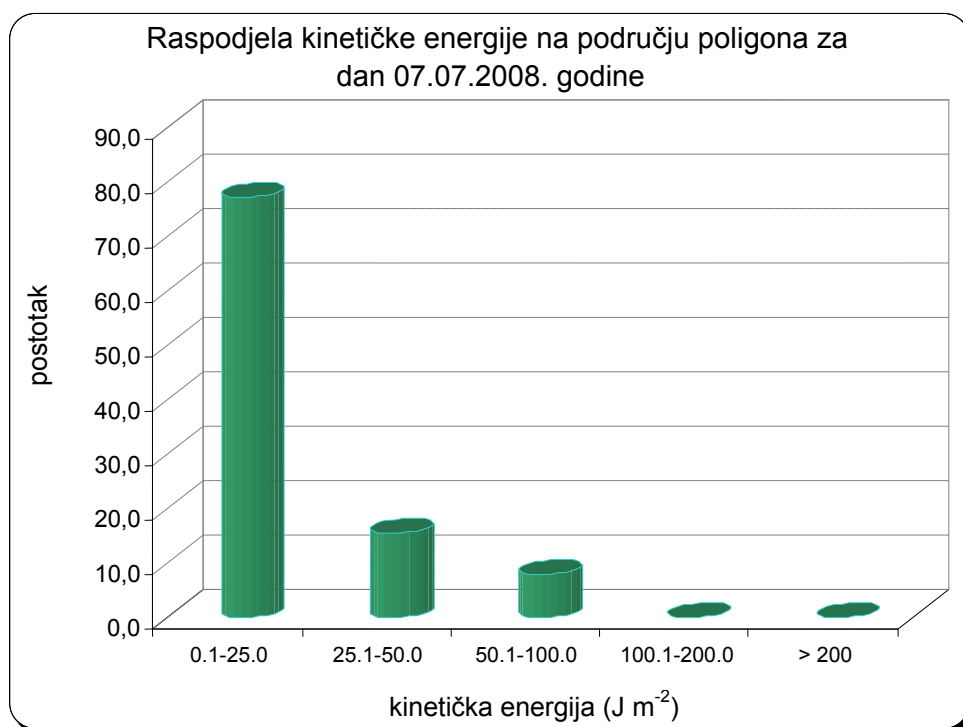
Slika 41. Prostorna raspodjela K.E. ($J m^{-2}$) za svaki tučomjer na poligonu za slučaj padanja tuče 7. srpnja 2008. godine

Rezultati analize prilagodbe funkcija pokazuju da gama funkcija daje najbolju prilagodbu distribucije promjera zrna tuče ukupnog traga tuče izmjenjenog na poligonu dana 7. srpnja 2008. godine (sl. 42.a), što potvrđuje i izračunati kvadrat koeficijenta korelacije od $R^2_{\text{gama}} = 0.9385$. Vrijednosti koeficijenta korelacije za Weibull funkciju je nešto manja ($R^2_{\text{weibul}} = 0.8991$) dok je koeficijent korelacije za eksponencijalnu funkciju znatno manji ($R^2_{\text{exp}} = 0.5663$). Uspješnost pojedine prilagodbe prikazana je na slici (sl. 42.b).



Slika 42.a) Normirani histogram promjera zrna tuče za 7. srpnja 2008. godine i prilagođene eksponencijalne, gama i Weibull funkcije, b) Dijagram raspršenja normiranih relativnih čestina promjera zrna dobivenih prilagodbama u odnosu na mjerenja. Pravac predstavlja 1 : 1 omjer

Dana 7. srpnja 2008. godine K.E._G (16) traga tuče površine od 44 km² na poligonu iznosila je 852.4 · 10⁶ J i bila je manja oko 14 puta u odnosu na energiju izmjerenu 17. lipnja 2008. godine. Raspodjela K.E. pokazuje da je na više od 70 % tučomjernih mjesta, tuča padala s K.E. u intervalu od 0.1 – 25 J m⁻² (sl. 43.). Na samo tri (25 %) tučomjerna mjesta



Slika 43. Raspodjela K.E. po intervalima mogućeg oštećenja za 7. srpanj 2008. godine na poligonu (tablica 11.)

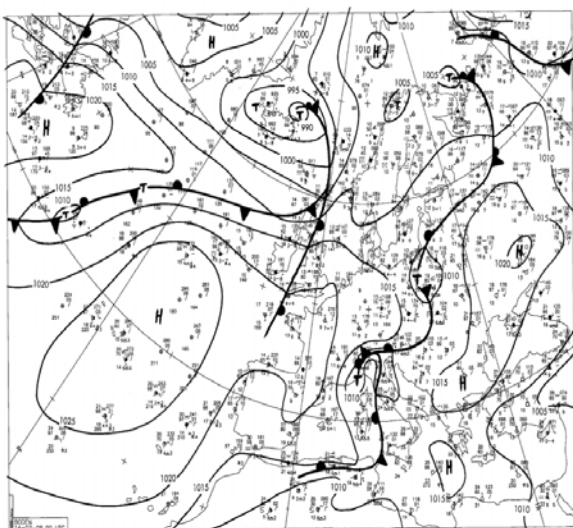
padala je tuča s K.E. u intervalu od 25.1 – 100 J m^{-2} , koja je mogla prouzročiti manju štetu na raznim biljnim kulturama u okolini tučomjera.

4.5.3. Slučaj grmljavinskog nevremena 14. srpnja 2008. godine

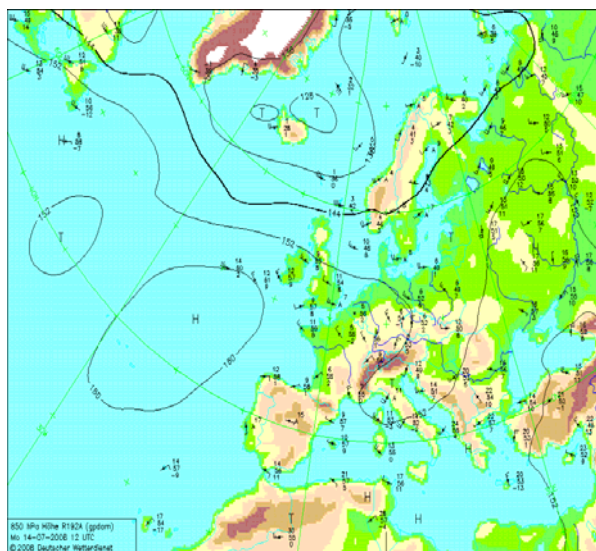
Opis sinoptičke situacije (DHMZ/ Odjel za vremenske analize i prognoze, 2008).

„Nad Genovskim zaljevom je plitka ciklona s hladnom frontom koja će se danas premještati preko naših krajeva prema istoku i jugoistoku (sl. 44.a). Po visini će se iznad nas premještati os doline iza čega će u sjeverozapadnoj struji početi pritjecati osjetno hladniji te suhi zrak (sl. 44.b). Vremenska prognoza za 14. srpnja 2008. godine od 8 do 20 sati predviđala je promjenljivo i pretežno oblačno povremeno s kišom, pljuskovima i grmljavinom. Ponegdje, osobito na istoku, bio je moguć i jači razvoj oblaka i izraženija nestabilnost uz olujan vjetar, pa i tuču. Noću, od 20 do sutra sljedećeg dana u 8 sati, predviđano je promjenljivo oblačno. Mjestimice je još moglo doći do ponekog pljuskusa i grmljavine, a vjerojatnost za jači lokalni razvoj oblaka i nestabilnost bila je uglavnom mala. Prognozirani je slab i umjeren sjeverni i sjeverozapadni vjetar. Vjerojatnost za pojavu grmljavine bila je velika, a vjerojatnost pojave tuče mala, samo mjestimice umjerena. Prognozom je predviđena izrazita nestabilnost a onda i konvektivni proces tijekom cijelog dana, a osobito poslijepodne na istočnom području, dok se za područja radarskih centara RC-1 Sljeme, RC-2 Varaždin i RC-2B Trema, (poligon) ne očekuje pojava nestabilnosti“.

a)



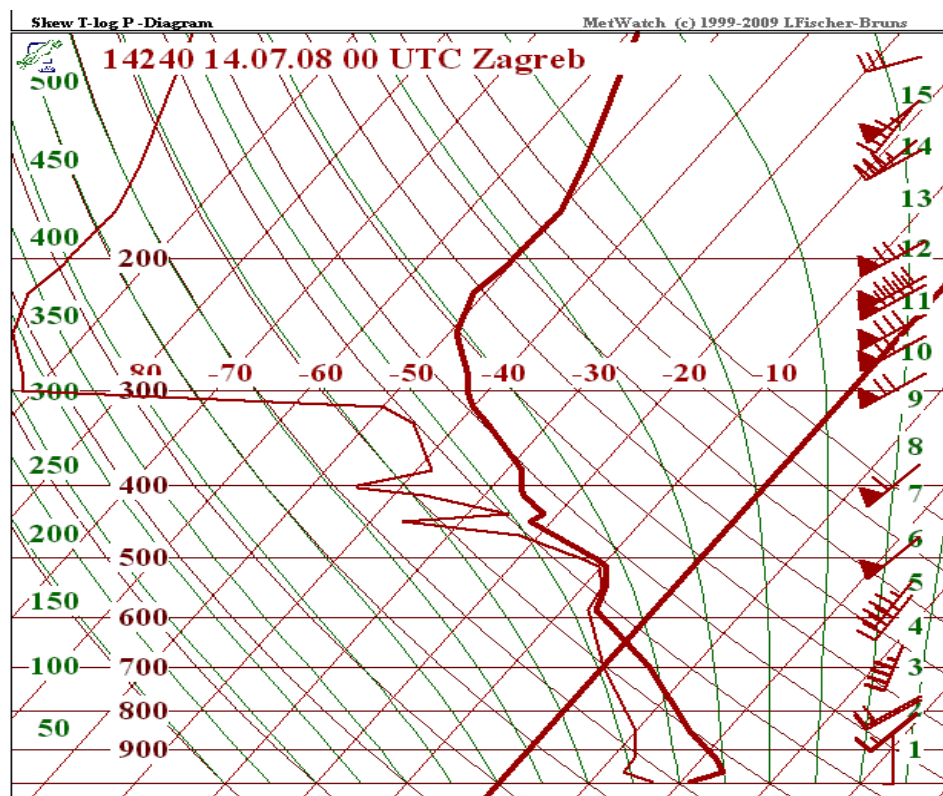
b)



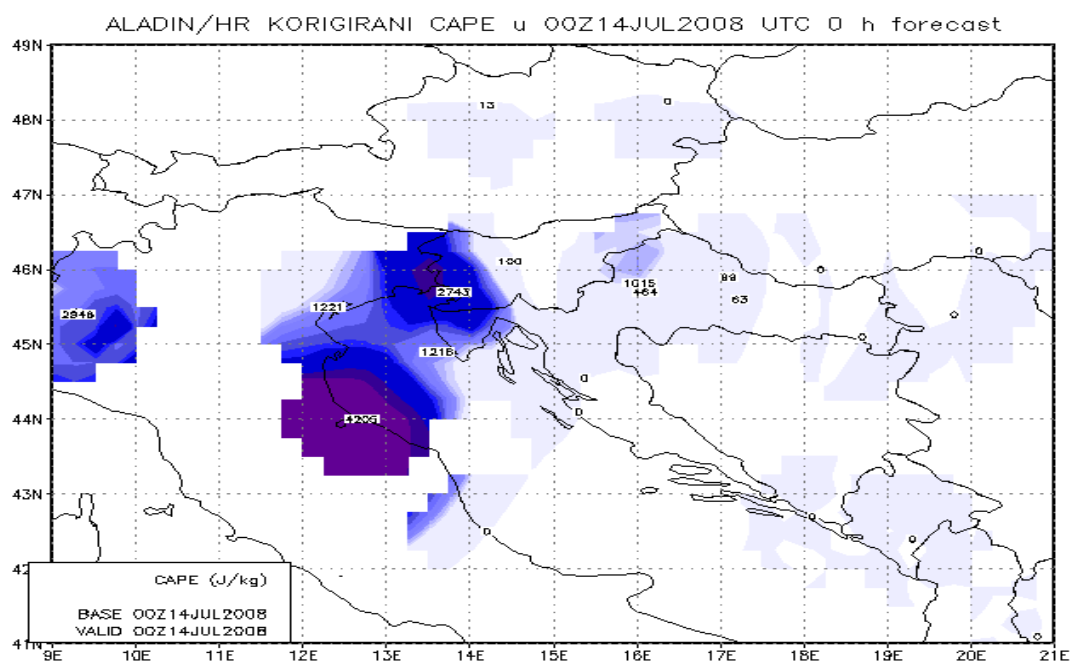
Slika 44. a) Karta prizemnog tlaka nad Europom u 00 UTC (01 CET); b) Visinska karta na 850 hPa nad Europom u 12 UTC (13 CET), 14. srpnja 2008. godine (Europäischer Wetterbericht, Deutsche Wetterdienst, 2008)

Termodinamički uvjeti za razvoj konvekcije (tablica 14.a-c) određeni na temelju sondaže na GMP Zagreb-Maksimir (sl. 45.) bili su razmjerno nepovoljni (mali), što nije ukazivalo na jači intenzitet grmljavinskog nevremena. Indeksi nestabilnosti bili su: $LI = -0.2$ $CAPE = 500.3 \text{ J kg}^{-1}$ i $BRN = 5.3$. Veće vrijednosti CAPE-a od 1015 J kg^{-1} dobivene su za područje Zagorja (sl. 46.) korištenjem operativnog numeričkog modela Aladin/HR (Kovačić, 2005.). Radarsko praćenje velike oblačne mase koja iz Slovenije polako dolazi na područje sjeverozapadne Hrvatske počinje oko 6:30 sati s RC Varaždin. Unutar te oblačne mase mjere se pojedinačne manje grmljavinske ćelije koje u 7:20 sati dolaze iznad područja poligona. Te grmljavinske ćelije promjera su između 5 i 8 km te visine vrha od 8 do 12 km. Primjer radarske slike (PPI i RHI) grmljavinske ćelije iznad poligona za dan 14. srpanj 2008. godine dan je na slici 47.

Tuča na poligonu s prekidima je padala u vremenskom intervalu od 7:20 do 8:25 sati na nekoliko odvojenih lokacija (sl. 48.). Ukupno je 17 tučomjernih mjesta javilo pojavu tuče, ali je samo 13 ploča tučomjera dostavljeno na analizu. Najveći udio velikih zrna tuče, a time i najveća K.E. od 211.9 J m^{-2} , zabilježena je na tučomjernom mjestu H02 (sl. 49). Nešto manje vrijednosti K.E. (od 35 do 68 J m^{-2}) izmjerene su u kontinuiranom tragu tuče na tučomjerima J13, J14 i J15. Na ovom primjeru može se vidjeti da je nekoliko Cb ćelija različitog intenziteta dalo tuču na različitim područjima poligona. Prvo tučom zahvaćeno područje nalazi se u gornjem lijevom kutu poligona i zahvaća područja tučomjera B04, B06, C03, C04, D04 i E04. Prosječna K.E. tog traga tuče iznosi 7.5 J m^{-2} , a promjer najvećeg izmjerenog zrna bio je 17.4 mm. Tuča najvećeg intenziteta zabilježena je na tučomjerima H01 i H02, s prosječnom energijom od 211.9 J m^{-2} i najvećim izmjerenim promjerom zrna od 24.3 mm. Trag tuče u daljnjem desnom djelu poligona (J08, J11, J13, J14, J15, I13 i I15) ima prosječnu K.E. od 32.8 J m^{-2} i maksimalni promjer zrna tuče od 16.3 mm. Prosječne vrijednosti parametara tuče na cijelom poligonu iznosile su: broj zrna tuče = 997 m^{-2} , K.E. = 38.4 J m^{-2} , masa (po jedinici površine) = 507.4 g m^{-2} , maksimalni promjer zrna tuče = 13.4 mm i vrijeme trajanja = 7.5 min.

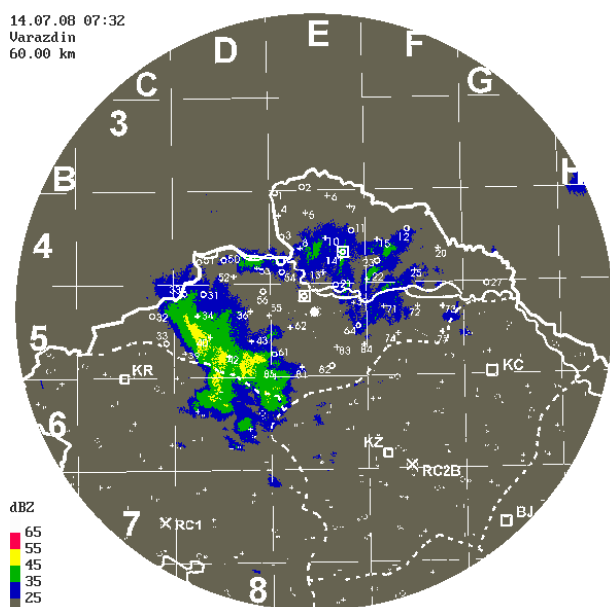


Slika 45. Radiosondažna mjerenja smjera i brzine vjetra, temperature i rosišta na GMP Zagreb-Maksimir za 14. srpanj 2008. godine (DHMZ, 2008)

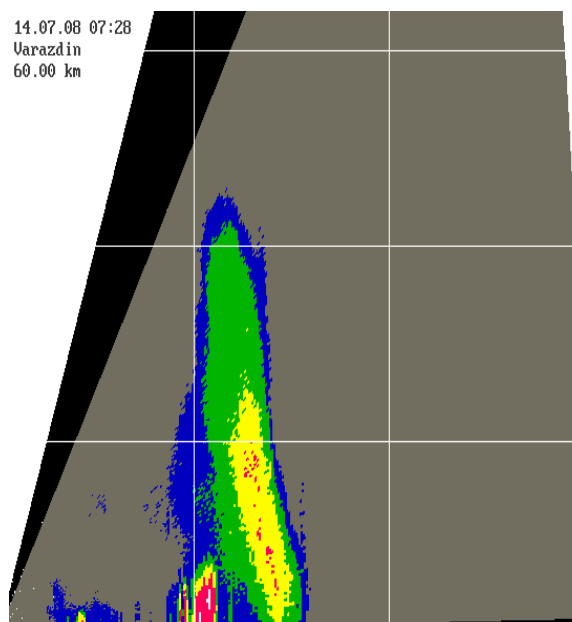


Slika 46. Prostorna raspodjela raspoložive konvektivne potencijalne energije CAPE za 14. srpanj 2008. godine prema podacima prognostičkog numeričkog modela Aladin/HR uz korekciju prizemnih podataka modela s podacima mjerenja (Kovačić, 2005)

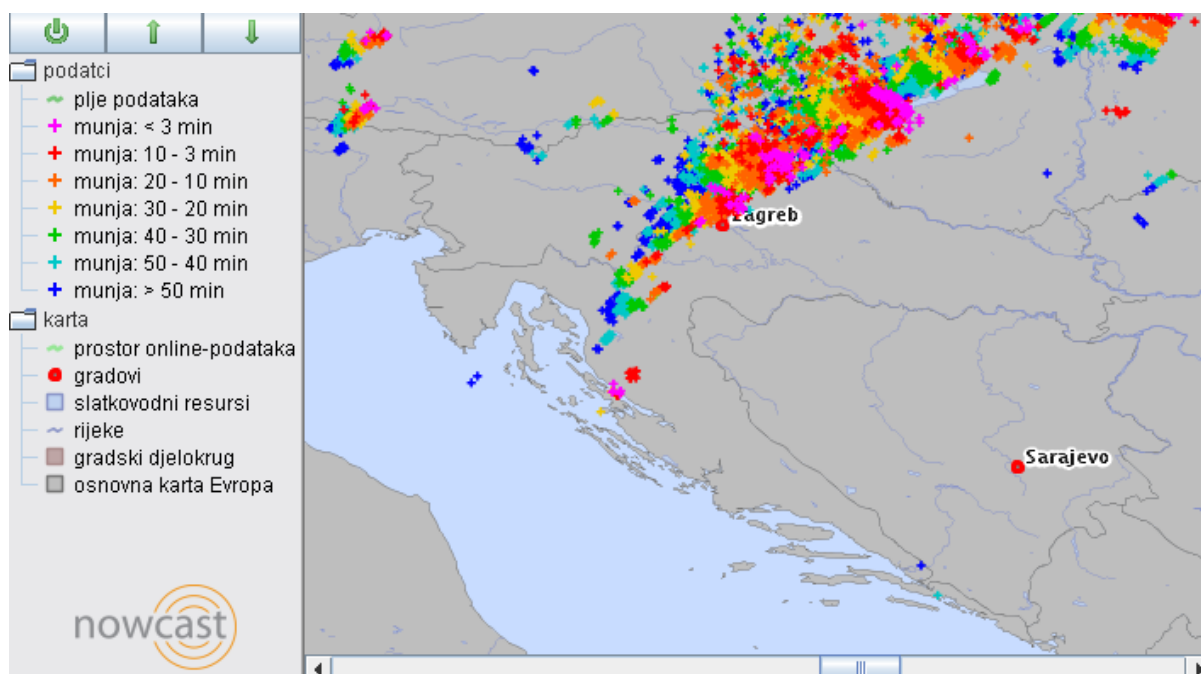
a)



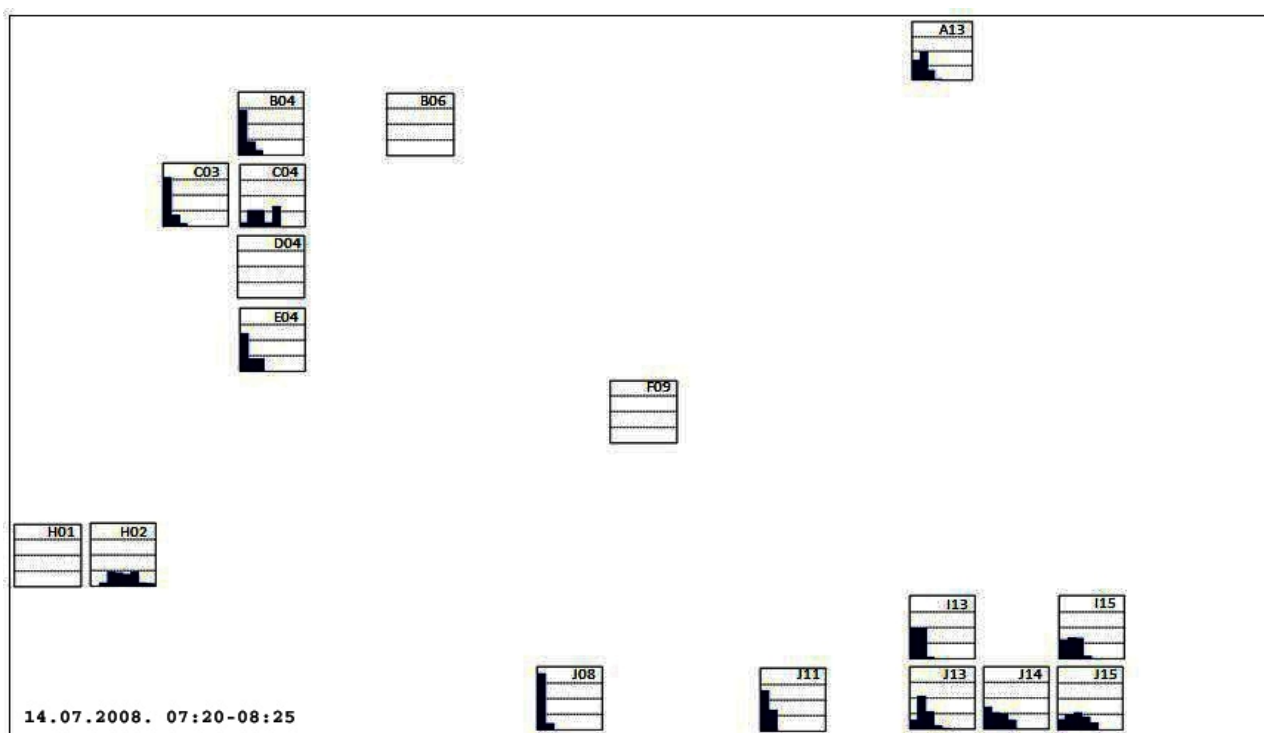
b)



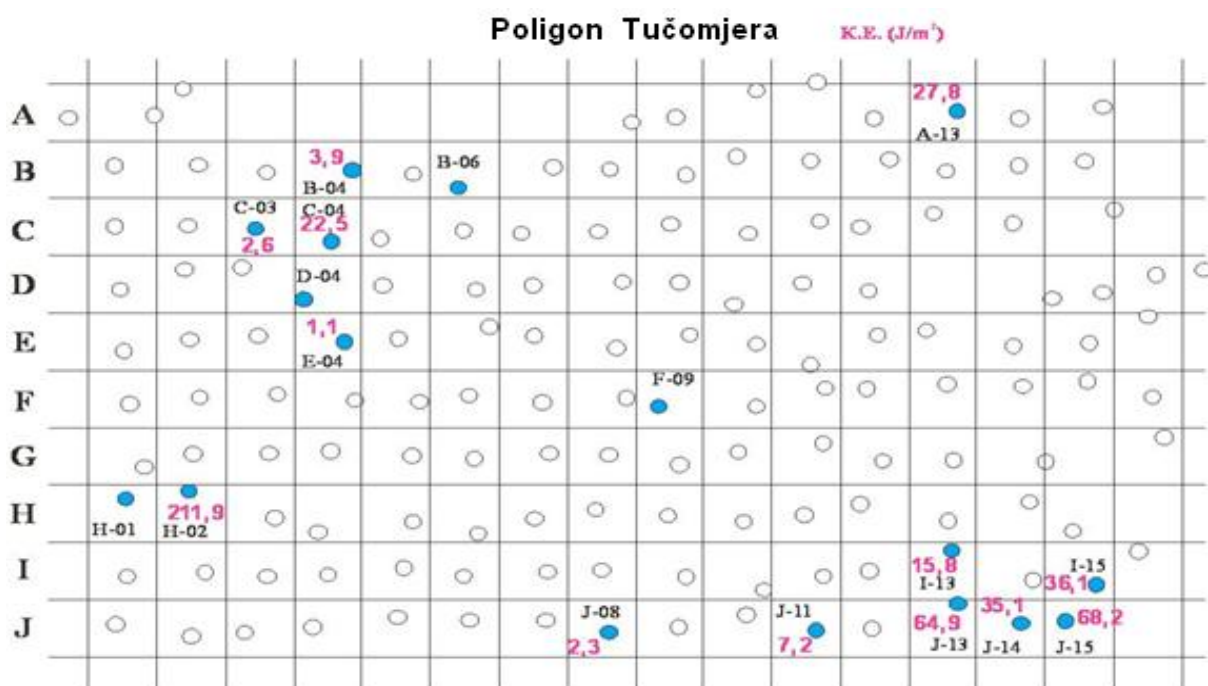
c)



Slika 47. Višećelijski Cb izmjeren radarom MER 93S, 14. srpnja 2008. godine iznad poligona na RC Varaždin u radnom dometu od 60 km, a) prostorni prikaz (PPI) oblačne ćelije iznad poligona u 07:32, b) vertikalni prikaz (RHI) Cb ćelije u 07:28. Horizontalne linije označavaju interval od 5 km, a vertikalne od 20 km, c) električna pražnjenja od 7:00 do 8:00 CET

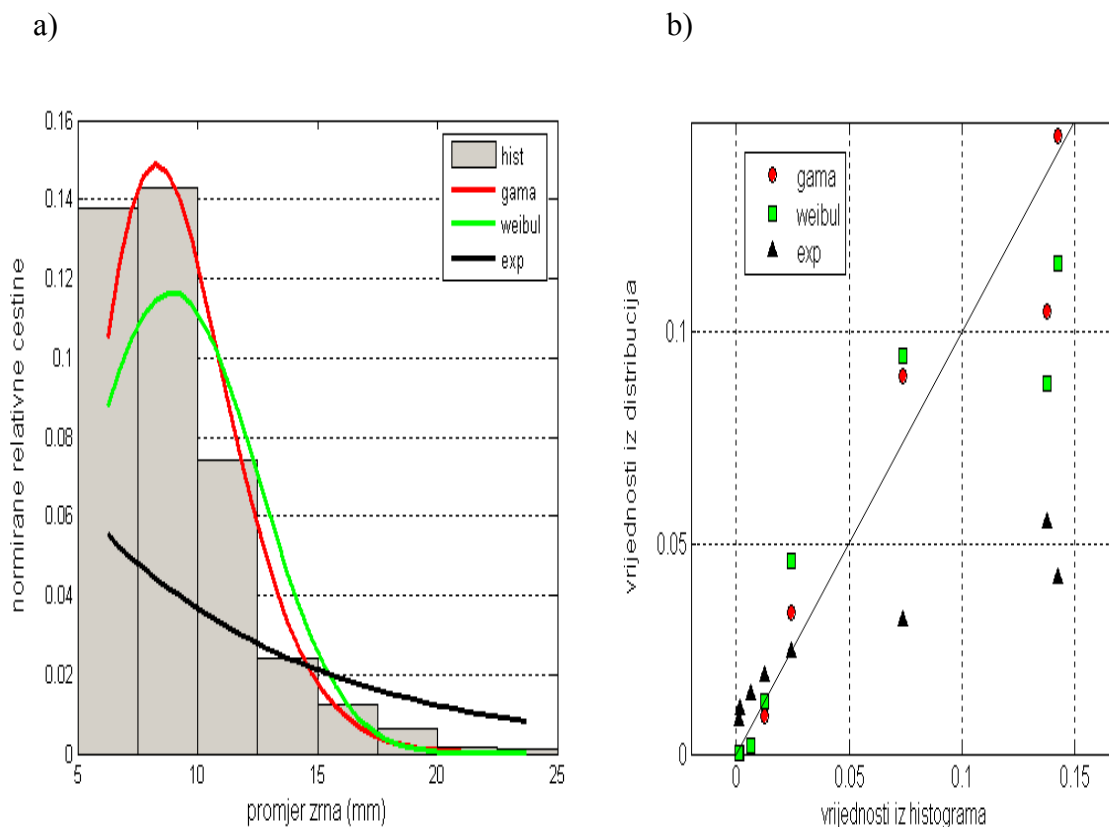


Slika 48. Prostorna raspodjela i histogram veličina zrna tuče za svaki tučomjer na poligonu za slučaj padanja tuče 14. srpnja 2008. godine. Vertikalna ljestvica podijeljena je na četiri intervala (25%) i prikazuje relativne (0-100%) čestine broja zrna tuče, a horizontalna os prikazuje promjere zrna tuče u intervalima od 2.5 mm, a početnom vrijednošću od 5 do 35 mm. Prazni kvadranti označavaju položaj tučomjera s pojavom tuče ali bez izmjerenih parametara zrna tuče



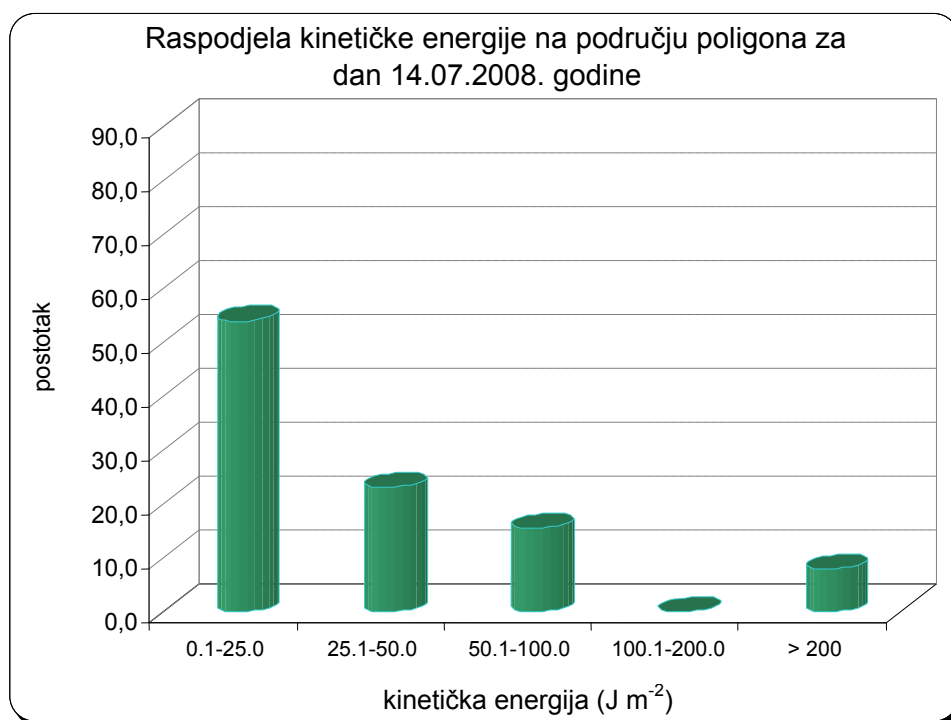
Slika 49. Prostorna raspodijela K.E. (J m^{-2}) za svaki tučomjer na poligonu za slučaj padanja tuče 14. srpnja 2008. godine

I za ovaj slučaj padanja tuče 14. srpnja 2008. godine rezultati analize prilagodbe pokazuju da gama funkcija daje najbolju prilagodbu histograma veličina zrna ukupnog traga tuče izmjenjenog na poligonu (sl. 50.a), što potvrđuje i izračunati kvadrat koeficijenta korelacije od $R^2_{\text{gama}} = 0,9445$. Vrijednosti koeficijenta korelacije za ostale funkcije su: $R^2_{\text{weibul}} = 0,8575$ i $R^2_{\text{exp.}} = 0,5695$. Slika 50.b prikazuje uspješnost pojedine prilagodbe.



Slika 50. a) Normirani histogram promjera zrna tuče za 14. srpanj 2008. godine i prilagođene eksponencijalne, gama i Weibull funkcije, b) Dijagram raspršenja normiranih relativnih čestina promjera zrna dobivenih prilagodbama u odnosu na mjerenja. Pravac predstavlja 1 : 1 omjer

Ukupna K.E.G (16) na području poligona za 14. srpnja 2008. godine iznosi $1\,997.6 \cdot 10^6$ J, a ukupna površina zahvaćena tučom je 78 km^2 . Raspodjela K.E. pokazuje da je na 50% mjernih mjesta tuča padala u intervalu od 0.1 do 25 J m^{-2} . Na ostalim tučomjernim mjestima zbog velike razlike u intenzitetu K.E. tuča je mogla prouzročiti malu do vrlo veliku štetu na biljnim kulturama (sl. 51.).



Slika 51. Raspodjela K.E. po intervalima mogućeg oštećenja za 14. srpanj 2008. godine na poligonu (tablica 11.)

Tablica 15. Kvadrat koeficijenta korelacije (R^2) fizičkih parametara tuče uspoređenih s K.E. (J m^{-2}) za područje Hrvatske, poligona i grmljavinskog nevremena 17. lipnja, 7. srpnja. i 14. srpnja 2008. godine

	HRVATSKA	POLIGON	POLIGON	POLIGON	POLIGON
razdoblje	2002.-2009.	2002.-2009.	17.06.2008.	7.07.2008.	14.07.2008.
Trajanje (min)	0.41	0.48	0.62	0.79	0.21
Maksimalni promjer (mm)	0.61	0.78	0.68	0.89	0.64
Broj zrna	0.68	0.44	0.59	0.24	0.76
Srednji promjer (mm)	0.52	0.64	0.71	0.87	0.77
Srednja masa (g m^{-2})	0.96	0.91	0.95	0.95	0.99

Na temelju analize parametara za tri odabrana slučaja grmljavinskih nevremena s tučom iznad poligona mogu se donijeti sljedeći zaključci:

- Indeksi nestabilnosti dobiveni radiosondažnim mjerenjem na GMP Zagreb-Maksimir, zbog prostorne udaljenosti i vremenskog termina mjerenja nisu uvijek dobri pokazatelji mogućnosti nastanka i intenziteta nestabilnosti za područje poligona (Zagorje). To se može dobro vidjeti na primjeru vrlo intenzivnog grmljavinskog nevremena s tučom 17. lipnja 2008. godine, kada su dobiveni indeksi bili mali i nisu ukazivali na mogućnost jačeg grmljavinskog nevremena. Boljim indikatorom nestabilnosti za područje poligona (Zagorja) pokazala se metoda izračunavanja CAPE-a za određeno područje korištenjem operativnog numeričkog modela Aladin/HR (Kovačić, 2005.).
- Usporedbom fizičkih parametara tuče s K.E. (tablica 15.) vidi se da masa zrna tuče ima najveću korelaciju s K.E.. Koeficijenti korelacije ostalih parametara tuče u ovisnosti su s ostalim karakteristikama grmljavinskog nevremena i njihove vrijednosti kreću se od 0.21 do 0.89.
- Gama funkcija daje najbolju prilagodbu distribuciji promjera zrna tuče na tlu. Kvadrat koeficijenta korelacije (R^2) za ova tri slučaja tuče na poligonu kreće se od 0.93 do 0.98. Sličan zaključak dobili su Ziegler i sur. (1983), Fraile i sur. (1999), te Fraile i sur., (2003.b) primjenjujući druge metode prilagodbe gama i eksponencijalne funkcije (metoda momenta i linearna regresijska metoda). Najvjerojatniji razlog bolje prilagodbe gama (kao i Weibul) funkcije u odnosu na eksponencijalnu je u tome što su prve dvije funkcije dvoparametarske, dok je eksponencijalna monotono padajuća jednoparametarska funkcija i njezina prilagodba najviše ovisi o veličini udjela zrna malog promjera (5-10 mm). Weibull funkcija je ovdje korištena zbog svoje sličnosti s gama funkcijom kao test za potvrdu bolje prilagodbe dvoparametarskih funkcija distribuciji zrna tuče, a dosad se je upotrebljavala kod potpuno drugačijih vrsta analiza (npr. ispitivanja izdržljivosti raznih vrsta materijala i proučavanju bure; Jeromel, i sur., 2009).
- K.E. tuče izmjerena na tučomjerima poligona (Zagorje) u promatrana tri slučaja grmljavinskog nevremena ima vrijednosti u intervalu od 0.1 – 278.2. J m⁻². Da bi se opisao intenzitet tuče i omogućila usporeba s intenzitetom drugih grmljavinskih oluja, koriste se međunarodne ljestvice intenziteta padanja tuče. Prema međunarodnoj Torro ljestvici intenziteta padanja tuče (Webb i sur., 1986; Sioutas i sur., 2009) u promatrana tri slučaja grmljavinskog nevremena izmjereni intenzitet bio je u kategorijama od H0 do H2.

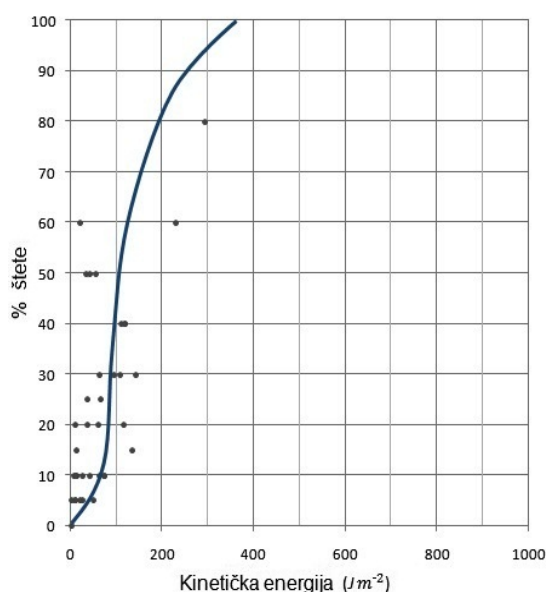
4.6. Odnos kinetičke energije i štete na biljnim kulturama

Na području kontinentalne Hrvatske, u razdoblju od 2002.-2009. godine, terenske ekipe Radarskih centara sakupile su 1004 izvješća o šteti na biljnim kulturama (vidi prilog 9.1) koje su se nalazile u neposrednoj blizini tučomjera. Podaci su spremljeni u računalnu bazu podataka, a primjer te baze dan je u tablici 9. Iz dobivenih podataka može se vidjeti da su na tom području od biljnih kultura najviše zastupljene žitarice (pšenica i ječam), kukuruz, vinova loza, duhan, voće i povrće (tab.6.). Analiza djelovanja K.E. i N_t na stupanj oštećenja biljnih kultura u raznim fazama njihovog razvoja, procijenjenog u neposrednoj blizini tučomjera (0-100 m), dala je slijedeće rezultate.

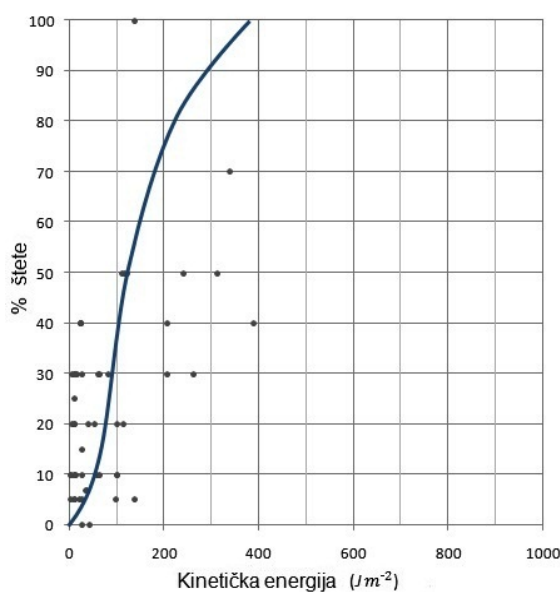
Prema raspoloživim podacima o oštećenju biljnih kultura (sve vrste i fenofaze), K.E. od 0.5 do 1359.6 J m⁻² i broj zrna između 64 i 15104 m⁻² uzrokovali su štetu (od 5 do 100 %) na biljkama u vrtovima, vinogradima i poljima. Prema svom razvoju i građi, različite biljne kulture nisu jednako otporne u svim fazama svog razvoja na utjecaj djelovanja fizičkih parametara zrna tuče (K.E. i N_t). Za najčešće zastupljene kulture u hrvatskom poljodjelstvu (vinovu lozu, pšenicu i kukuruz) napravljena je, za svaku fenofazu, analiza iznosa oštećenja pripadne K.E. i N_t . Na slici 52.a-d prikazan je odnos K.E. zrna tuče i štete na vinovoj lozi u tri osnovne faze razvoja (vegetacija u travnju i svibnju (a), lipnju (b) te srpnju i rujnu (c)). Prema dobivenim rezultatima vidi se da je vinova loza najosjetljivija u travnju i svibnju, kada K.E. od 50 J m⁻² može uzrokovati štetu oko 10 %. Iznos K.E. od 100 J m⁻² može oštetiti vinovu lozu oko 60 %, dok vrlo velika ili potpuna (100 %) šteta nastaje udarom zrna tuče s energijama većim od 200 J m⁻². U svojim fazama razvoja u lipnju, te srpnju i rujnu, vinova loza je nešto manje osjetljiva nego u prvoj fazi svog razvoja. K.E. od 200 J m⁻² nanosi štetu od preko 70 %, a potpuna šteta može se očekivati s energijama većim od 300 J m⁻². Ovi rezultati odnosa K.E. i intenziteta oštećenja vinove loze gotovo su identični s dobivenim rezultatima Austrijskog osiguravajućeg društva (sl. 8.), iz čega se vidi realna procjena intenziteta šteta članova terenskih ekipa RC-a. Na slici 52.d prikazan je usporedni odnos osjetljivosti vinove loze u različitim fazama razvoja kod istih iznosa K.E.

N_t je drugi parametar koji uz K.E. direktno utječe na iznos štete na biljnim kulturama. Na slici 53.a-d prikazan je odnos N_t i iznosa oštećenja vinove loze. Neovisno o promjeru, oko 2000 zrna tuče na kvadratnom metru može u travnju i svibnju na vinovoj lozi napraviti oko 20 % štete. Ovisno o fenofazi 4000 zrna, može napraviti štetu između 30 i 40 %. Porastom broja

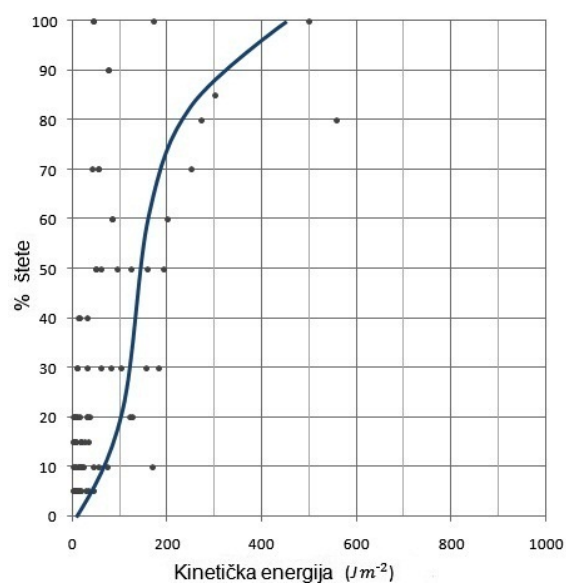
zrna raste intenzitet oštećenja, te na osnovu dosad skupljenih podataka može se zaključiti da potpuna šteta nastaje kada se broj zrna tuče koji je pao kreće između 6000 i 8000 m^{-2} .



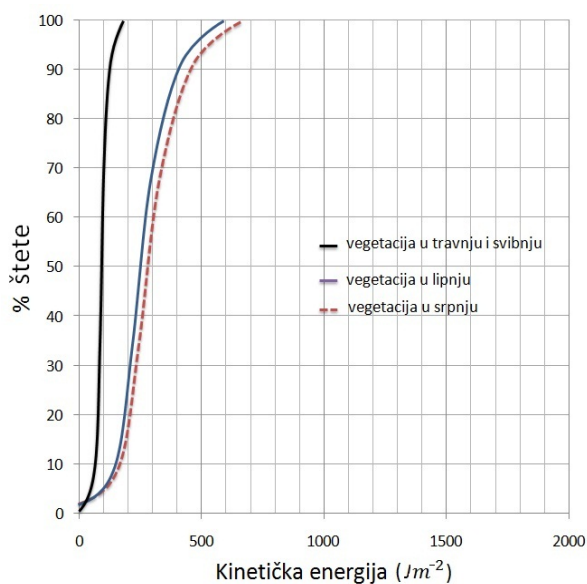
a) travanj-svibanj



b) lipanj



c) srpanj-rujan

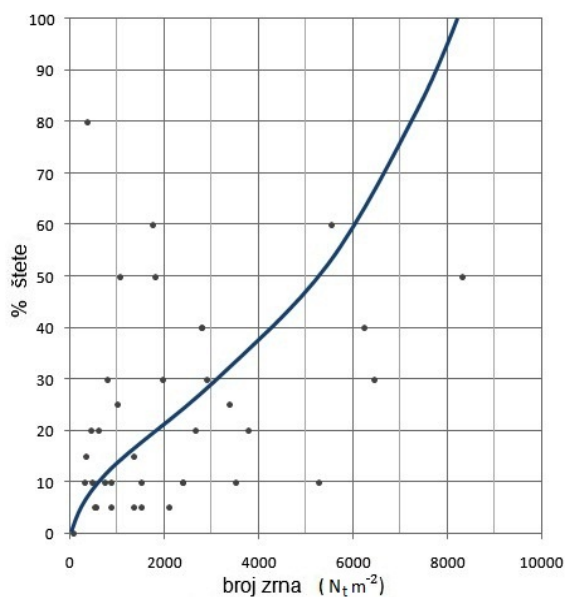


d) fenofaze vinove loze

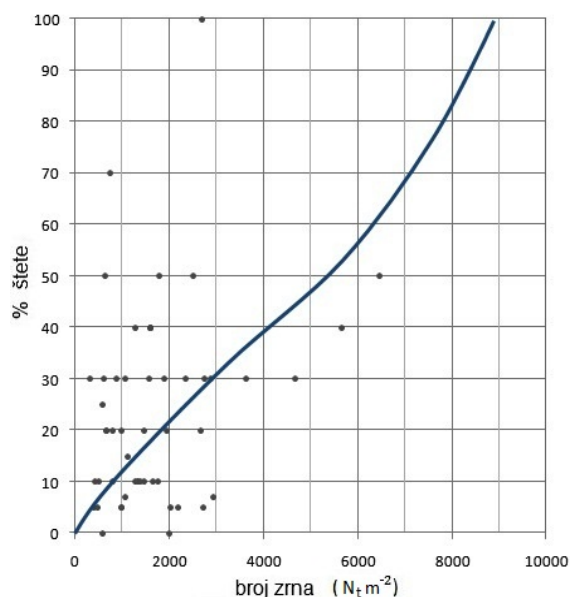
Slika 52.(a-d) Odnos K.E. i intenziteta oštećenja vinove loze u različitim fazama (fenofazama) svog razvoja. Točke na slikama 52.a-c prikazuju procijenjene/izmjerene vrijednosti oštećenja biljne kulture i pripadne K.E, 52.d daje usporedni prikaz oštećenja za sve fenofaze (tablica 9). Krivulje su dobivene subjektivnom interpolacijom

Na slikama 54. i 55. prikazani su iznosi oštećenja za sve faze razvoja kukuruza i pšenice u odnosu na veličinu K.E. i N_t . Kod većine biljnih kultura u svim fazama njihova razvoja, vidi

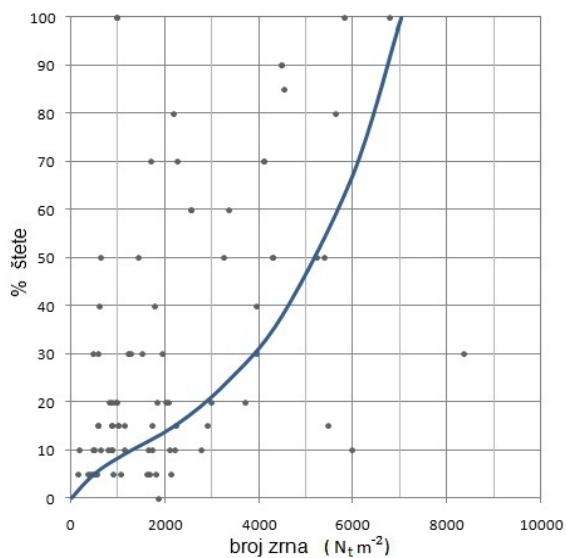
se da velike i/ili potpune štete nastaju nakon udara zrna tuče s energijama većim od 200 J m^{-2} i $N_t > 4000 \text{ m}^{-2}$.



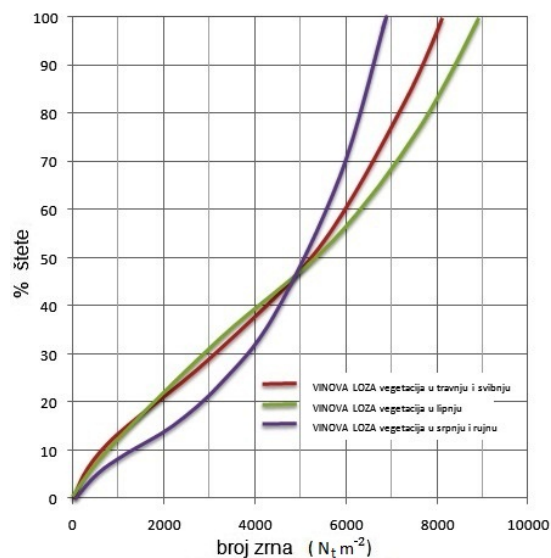
a) travanj - svibanj



b) lipanj



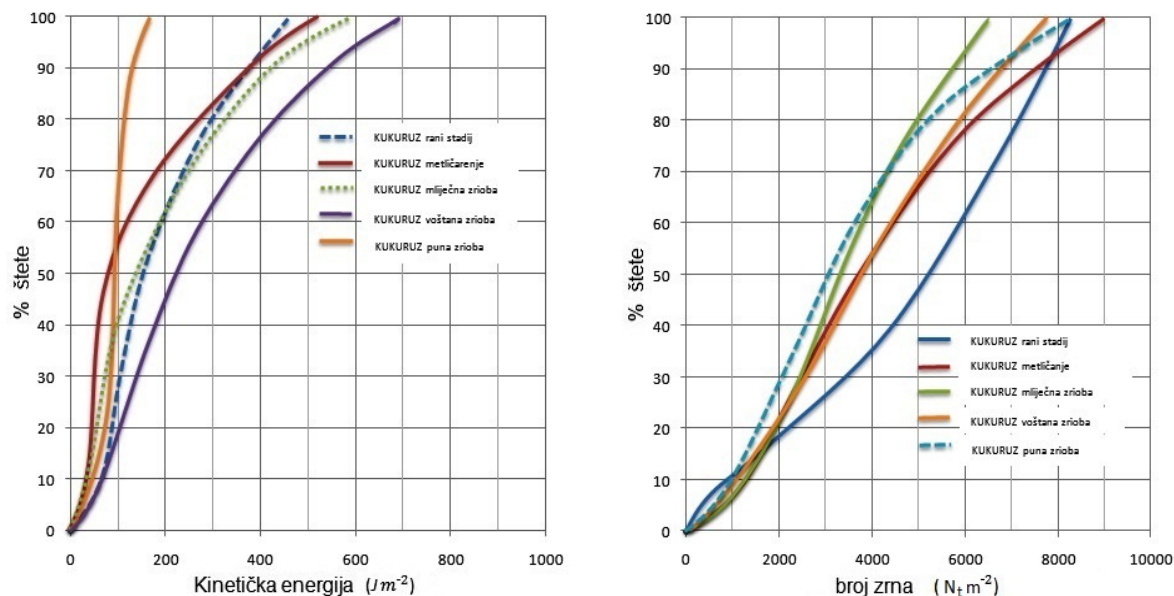
c) srpanj- ruj



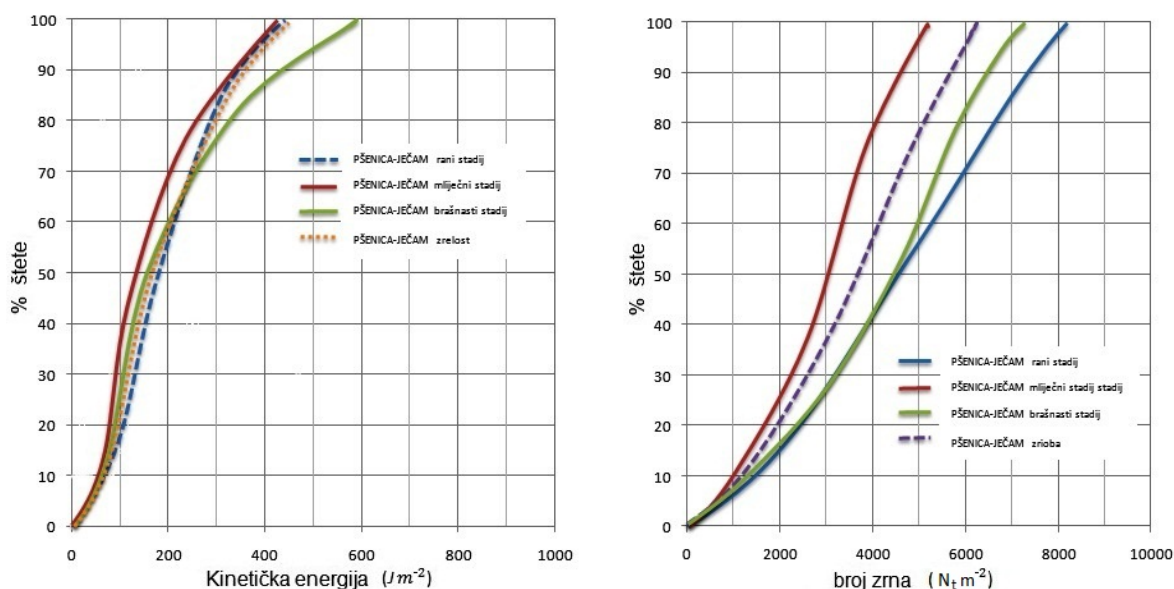
d) fenofaze vinove loza

Slika 53. (a-d) Odnos broja zrna tuče i intenziteta oštećenja vinove loze u različitim fazama (fenofazama) razvoja iste. Točke na slikama 53.a-c prikazuju procijenjene/izmjerene vrijednosti oštećenja biljne kulture i broja zrna tuče, 53.d daje usporedni prikaz oštećenja za sve fenofaze

Vrlo slične granične vrijednosti od 200 J m^{-2} , koje na većini biljnih kultura daju veliku štetu ($> 80\%$), na temelju svojih podataka dobili su Katz i Garcia (1981), Tondout i sur. (1983) i Svabik (1989).



Slika 54. Utjecaj K.E. i N_t na iznos oštećenja kukuruza u raznim fazama razvoja



Slika 55. Utjecaj K.E. i N_t na iznos oštećenja pšenice u raznim fazama razvoja

Same štete na tlu ovise o iznosu K.E., vrsti biljne kulture i fenofaze u kojoj se nalaze. Primarno se može reći da veća K.E. daje i veće štete. Isti iznosi K.E. na raznim kulturama daje i različite štete. Iz dobivenih rezultata vidi se da je K.E. najbolji pokazatelj intenziteta šteta na

biljnim kulturama, dok sam podatak o ukupnom broju zrna tuče (bez podatka o veličini) nije uvijek točna mjera intenziteta oštećenja raznih biljnih kultura (oblik stabljike i lista, položaj, osjetljivost i izgled ploda). Na osnovu analize svih podataka o šteti na biljnim kulturama i pripadnoj K.E. udara zrna tuče, definirani su intervali iznosa kinetičke energije za potrebe vremenske i prostorne analize na području kontinentalne Hrvatske (tablica 11.). Kod izrade zaštitnih mreža ovi podaci mogu pomoći kod određivanja čvrstoće zaštitnih mreža, tipu konstrukcije i lokacijama za koje su one najisplativije.

Tablica 11. Podjela kinetičke energije na intervale intenziteta mogućeg oštećenja različitih biljnih kultura

0.1 – 25.0 J m ⁻²	bez ili neznatna šteta
25.1 – 50.0 J m ⁻²	mala do umjerena šteta
50.1 – 100.0 J m ⁻²	umjerena do velika šteta
100.1 – 200.0 J m ⁻²	velika šteta
➤ 200.0 J m ⁻²	vrlo velika šteta (sve biljne kulture i fenofaze)

5. ZAKLJUČAK

U ovom radu su prvi puta prikazane metode mjerenja, fizičke karakteristike, raspodjela i intenzitet (K.E.) zrna tuče u kontinentalnom dijelu Hrvatske. U istraživanju su uz izmjerene parametre tuče korišteni radarski podaci kao i podaci o intenzitetu oštećenja biljnih kultura.

Mjerenje i registracija pojave zrna tuče na tlu je zbog vremenskih i prostornih varijacija i kratkog trajanja vrlo složeno. Motivacija za ovo istraživanje bila je da se, postavljanjem mjernih instrumenata – tučomjera na glavne meteorološke i postaje obrane od tuče, izmjeri i provede detaljna analiza fizičkih parametara tuče na području kontinentalnog dijela Hrvatske sa željom da dobiveni rezultati istraživanja pomognu u poboljšanju zaštite od te elementarne nepogode. Mjerenja tuče pomoću tučomjera provodi se u nekim zemljama Europe i više od 20 godina i daje sve karakteristike tuče na nekom području, za razliku od dosadašnjeg osnovnog mjerenja/brojenja dana s tučom u mjesecu/godini na meteorološkim postajama. Postavljanje tučomjera na postaje počelo je 2001. godine, a gusta mreža tučomjera – poligon, postavljena je početkom 2002. godine na području Hrvatskog zagorja. U razdoblju od 2002. do 2009. godine na svim tučomjernim mjestima (njih 730) kontinentalnog dijela Hrvatske i poligona skupljeno je 2 276 ploča tučomjera koje su zabilježile tuču. Ovaj broj predstavlja oko 70 % svih registriranih slučajeva tuče na tom prostoru.

Analiza je pokazala da je u razdoblju od 2002. do 2009. godine došlo je do povećanja srednjeg broja dana s grmljavinom (81) i tučom (41) u usporedbi s razdobljem od 1981. do 2001. godine (s grmljavinom 76 i tučom 34). Rast intenziteta grmljavinskih oluja (ne i broja dana s grmljavinom) u Hrvatskoj za promatrano razdoblje potvrdio je i provedeni t-test našavši statistički značajnu razliku u broju dana s tučom. U promatranom razdoblju najviše zrna tuče (52 %) palo je u intervalu veličine od 5 do 7.5 mm, dok je u intervalu 7.6 do 10 mm palo 26.2 % svih zrna, a srednji promjer zrna na području Hrvatske iznosio je 8.1 mm. Najveće izmjereno zrno od 34.5 mm zabilježeno je u istočnom ravničarskom dijelu Hrvatske. Nađen je negativni trend udjela zrna tuče najmanjeg promjera (5 – 7.5 mm) i pozitivni trend udjela zrna tuče većeg promjera (10.1 – 15 mm), kao posljedica većih ili/i jačih uzlaznih struja i intenzivnijih grmljavinskih ćelija. Dvoparametarska gama funkcija daje najbolju prilagodbu distribuciji promjera zrna tuče na tlu. Srednja K.E. za promatrano razdoblje u Hrvatskoj iznosi 36.0 J m^{-2} , a najveće mjesečne vrijednosti su zabilježene u lipnju 45.7 J m^{-2} . Na osnovi podataka o mjesečnoj raspodjeli čestine tuče srednje K.E. može se zaključiti da je najčešća i najintenzivnija konvektivna aktivnost na području kontinentalne Hrvatske u lipnju,

kada je i nestabilnost atmosfere najveća. Dodatnu potvrdu rasta intenziteta grmljavinskih oluja daju rezultati statističke analize trenda (Mann-Kendall test) prosječne dužine padanja tuče u sezoni za razdoblje od 1981. do 2009. godine, koji potvrđuju da je trend pozitivan i statistički značajan. Prosječna dužina padanja tuče u Hrvatskoj iznosi 4.2 min, dok je na poligonu zabilježen slični uzlazni trend ali s dužim vremenskim intervalom od 6.5 min.

Najvjerojatniji razlog duljem padanju tuče na poligonu u usporedbi sa cjelokupnim područjem Hrvatske je utjecaj orografije na smjer i brzinu gibanja Cb ćelija, tj. dolazi do usporavanja ili stagnacije ćelija ispred planina ovisno o njezinom smjeru nailaska. Rezultati tog utjecaja vide se u većoj čestini pojave tuče, većoj K.E., promjeru zrna i dužem trajanju padanja tuče na područjima blizu planina. Provjera ovih rezultata na poligonu izvršena je pomoću metode EOF-a, gdje su analizirani K.E. i d_m , kako bi se utvrdilo koji vanjski faktori imaju utjecaja na prostorne i vremenske distribucije tih parametara. Rezultati analize statistički potvrđuju utjecaj orografije i posebno ističu veliki utjecaj Ivančice na području poligona. Te rezultate na području Hrvatske potvrđuje i prostorna raspodjela slučajeva tuče većeg intenziteta (H3-H5) izmjenjenog po Torro ljestvici.

Dodatno, rezultati ukazuju i na porast intenziteta grmljavinskih oluja na području kontinentalne Hrvatske u promatranom razdoblju. Odgovor je li taj porast vezan uz promjenu globalne klime ili je u pitanju samo interna varijabilnost lokalne klime, mogu dati daljnja istraživanja i duži vremenski niz podataka. Ovi rezultati mogu se koristiti kod istraživanja grmljavinskih oluja, evaluacije modifikacije vremena, testiranja numeričkih modela, u osiguravajućim agencijama, te kod konstrukcije i izrade pasivnih sredstava zaštite (mreže), kao i određivanja područja na kojima je opravdano postavljanje zaštitnih mreža. Ovaj prikaz klimatologije tuče u Hrvatskoj je jedan od prvih koraka kod izrade buduće globalne klimatologije tuče.

6. LITERATURA

- Bluestein, H. B., 2007: Advances in applications of the physics of fluids to severe weather systems
Reports on Progress in Physics, 70., 1259.-1323.
- Chagnon, S.A., 1968.: Summary of 1967. hail research in Illinois. Research Report 39., Crop Hail
Insurance Actuarial Association, Chicago, USA, 50 str.
- Chagnon, S.A., 1970.: Hailstreaks. Journal of the Atmospheric Sciences, 27., 109.-125.
- Cheng, L., English, M., 1983.: A relationship between hailstone concentration and size
Journal of the Atmospheric Sciences, 40., 204.-213.
- Cheng, L., English, M.; Wong, R., 1985.: Hailstone size distributions and their relationship to storm thermodynamics
Journal of Climate and Applied Meteorology, 24., 1059.-1067.
- Cotton, W.R., Anthes, R.A., 1989.: Storm and Cloud Dynamics
Academic Press, Inc., San Diego. International Geophysics Series, 44., 883 str.
- Crow, E. L., Long, A. B., Dye, J. E., Ulbrich, C. W., 1979.: Results of a randomized hail suppression experiment in northeast Colorado
Part III: Analysis of hailstone size distributions for seeding and yearly effects
Journal of Applied Meteorology, 18., 1559.-1568.
- Ćurić, M., 2001: Dinamika oblaka
Miltin, Beograd, 262 str.
- Decker, F. W., Calvin, L.D., 1961: Hailfall of 10 September 1959 near Medford, Oregon
Bulletin of the American Meteorological Society, 42., 475.- 480.
- Dennis, A. S.; Musil, D.H., 1973.: Calculations of hailstone growth and trajectories in a simple cloud model
Journal of the Atmospheric Sciences, 30., 278.-288.
- Dessens, J.; Berthet, C.; Sanchez, J.L., 2007.: A point hailfall classification based on hailpad measurements: the ANELFA scale
Atmospheric Research, 83., 132.- 139.
- Dessens, J.; Berthet, C.; Sanchez, J.L., 2009.: Yearly fluctuation of hail precipitation in France
5th European Conference on Severe Storms, Landshut, Germany, 47.
- DHMZ/ Odjel za vremenske analize i prognoze, 2008.: Dnevna prognoza za potrebe Odjela obrane od tuče
Državni hidrometeorološki zavod, arhiva Radarski centar Varaždin 2008. godina.
- Europäischer Wetterbericht, 2008.: Deutscher Wetterdienst, 33., 169.

- Farnell, C., Busto, M., Aran, M., Andres, A., Pineda, N., Tora, M., 2009.: Study of the hailstorm of 17 September 2007 at the Plad'Urgel
Part one: fieldwork and analysis of the hailpads. *Tethys*, 6., 69.-81.
- Ferari, P., 1993.: Hail activity evaluation in a little intensive fruit – growing district of the Non Valley
Internationaler Symposium “Hagel and Konsequenzen” Krems, Austria, 41.-42.
- Fraile, R., Sanchez, J., L. de la Madrid, A., Castro, A., Marcos, J., 1999.: Some results from the hailpad network in Leon (Spain): Noteworthy correlations among hailfall parameters
Theoretical and Applied Climatolology, 64., 105.-117.
- Fraile, R., Berthet, C., Dessens, J., Sanchez, J.L., 2003a.: Return periods of severe hailfalls computed from hailpad data
Atmospheric Research, 67.-68., 189.- 202.
- Fraile, R., Castro, C., Lopez, L., Sanchez, J.L., Palencia, C., 2003b.: The influence of melting on hailstone size distribution
Atmospheric Research, 67.-68., 203.- 213.
- Frančula, N., Lapaine, M., Vučetić, N., 1997.: Izbor kartografske projekcije za karte sitnih mjerila
Geodetski list 51, 43-52, Hrvatsko geodetsko društvo, Zagreb.
- Fujita, T.T., 1971.: Proposed Characterization of Tornadoes and Hurricanes by Area and Intensity.
Satellite and Mesometeorology Research Paper 91, Department of Geophysical Sciences, University of Chicago, Chicago, Il.
- Giaotti, D., Ganesini, E., Stel, F., 2001.: Heuristics considerations pertaining to hailstone size distributions int the plain of Friuli-Venezia Giulia
Atmospheric Research, 57., 269.-288.
- Gil-Robles, B., Sanchez, J.L., Garcia-Ortega, E., Marcos, J.L., Lopez, L., 2009.: Signature of hail precipitation on the ground
5th European Conference on Severe Storms, Landshut, Germany, extended abstract, 329.-330.
- Gilbert, R. O., 1987.: Statistical methods for environmental pollution monitoring
John Wiley & Sons, Incorporated, New York
- Grisogono, B., Belušić, D., 2008.: Uvod u mezoskalnu meteorologiju i atmosfersku turbulenciju
Geofizički odsjek, PMF, Sveučilište u Zagrebu, 148. str.
www.gfz.hr/osobne_stranice/grisogono/DM2i3_SKRIPTA.pdf
- Jeromel, M., Malačić, V., Rakovec, J., 2009.: Weibull distribution of bora and sirocco winds in the northern Adriatic Sea
Geofizika, 26., 1., 85.-100.
- Held, G., 1973: Ten years of hail observations in the Pretoria-Witwatersrand area
Journal de Recherches Atmospheriques, 7., 195.-199.

- Holton, J. R., 2004.: An Introduction to Dynamic Meteorology
Academic Press, 4rd edition, San Diego, USA, 535. str.
- Katz, R. W., Garcia, R.R., 1981.: Statistical relationships between hailfall and damage to wheat
Agricultural Meteorology, 24., 29.-43.
- Kovačić, T., 2005.: Diagnostics maps of CAPE from LAM and data from network of synoptic stations
The 28th International Conference on Alpine Meteorology (ICAM) / Scientific Meeting of the Mesoscale Alpine programme (MAP), Zadar, Croatia, 40., 377.-380.
- Long, A.B., 1978.: Design of hail measurement networks
Atmosphere-Ocean, 16., 35.-48.
- Lozovski, E.P., Strong, G.S., 1978.: On the calibration of hailpads
Journal of Applied Meteorology, 17., 223.-254.
- Ludwig, F.J., Horel, J., Whiteman, C.D., 2004.: Using EOF analysis to identify important surface wind patterns in mountain valleys
Journal of Applied Meteorology and Climatology, 43., 969.-983.
- Marshall, J. S., Palmer, W., 1948.: The distribution of raindrops with size
Journal of Meteorology, 5., 165.-166.
- Matson, R., Huggins, A.W., 1979.: Field observations of the kinematics of hailstones
National center for atmospheric research /Technical note, Boulder Colorado, USA, 139 str.
- Mezeix, J.F.; Admirat, P., 1978.: The measurement of hail at ground level
Atmosphere-Ocean, 16., 61.-68.
- Mezeix, J.F., Doras, N., 1981.: Various kinetic energy characteristics of hailpatterns in the Grossversuch IV experiment
Journal of Applied Meteorology, 20., 4., 179.-186.
- Mezeix, J.F., 1990.: Further exploatory evaluation of Grossversuch IV using hailpad data: Analysis of hail patterns and stratification by storm type for seeding effect
Journal of Applied Meteorology, 29., 401.-417.
- Mitchell, J.M., Dzerdzeevskii, B., Flohn, H., Hofmeyr, W.L., Lamb, H.H., Rao, K.N.& Wallen, C.C., 1966: Climatic Change. Report of a working group of the Commision for Climatology.
WMO Tecnical Note 79. Geneva, Switzerland: WMO.
- Moisselin, J. M., Guillande, R., 2004.: Development of intensity scales for a wide set of natural phenomena.
European Meteorological Society, Annual Meeting Abstracts, Nice, France, 1., poster 00134.
- Nelson, S.P., 1983.: The influence of storm flow structure on hail producer
Part II: General characteristics and implications for hail growth
Journal of the Atmospheric Sciences, 40., 891.-898.

- Palencia, C., Berthet, C., Massot, M., Castro, A., Dessens, J., Fraile., 2007.: On the individual calibration of hailpads
Atmospheric Research, 83., 493.- 504.
- Palencia, C., Castro, A., Giaotti, D., Stel, F., Vinet, F., Fraile., 2009.: Hailpad-based research: A bibliometric review
Atmospheric Research, 93., 664.- 670.
- Peti, D., 2009.: Obrana od tuče, Meteorološki i hidrološki bilten, DHMZ, Zagreb, 11., 41.- 43.
- Pliberšek, T, 2009.: Točemerni poligon
Mednarodna konferenca o aktivni obrambi pred točo, Maribor, Slovenija, Powerpoint prezentacija.
- Počakal, D., 1988.: Određivanje veličine zrna tuče, Zbornik radova, JUKEM, Split, 1061.- 1067.
- Počakal, D., 2002.: Projekt "Ocjena efikasnosti djelovanja OT- a u Hrvatskoj pomoću poligona tučomjera", DHMZ, Zagreb, 30 str.
- Počakal, D., 2003. a: Metode i rezultati ocjene uspješnosti djelovanja sustava obrane od tuče
Hrvatski meteorološki časopis, 38., 35.-50.
- Počakal, D., 2003. b: Comparison of hail characteristic in NW Croatia for two periods
Natural Hazards, 29., 543.-552.
- Počakal, D., Večenaj, Z., Štalec, J., 2009.: Hail characteristics of different regions in the continental part of Croatia
Atmospheric Research, 93., 516. - 525.
- Počakal. D., 2011.: Hailpad data analysis for continental part of Croatia
Meteorologische Zeitschrift, 20., 4., 441.-447.
- Počakal, D. i Večenaj, Ž., 2011.: EOF analysis of the hailpad data for the polygon in Croatia, ECSS 2011, Palma de Mallorca, Španjolska, extended abstract i poster 35.
- Rudolf, R.C., Sackiw, C.M., Riley, G.T., 1994.: Statistical evaluation of the 1984.-88.
Seeding Experiment in northern Greece
Journal of Weather Modification, 60., 53.-59.
- Sanchez, J. L., 2004.: Severe storms in Spain
ECSS 2004, Workshop on Severe Convective Storms, Eumetsat and Universidad de Leon, Leon, Spain (CD-ROM), nn.
- Sanchez, J.L., Gil-Robles, B., Dessens, J., Martin, E., Lopez, L., Marcos, J.L., Berthet, C., Fernandez, J.T., Garcia-Ortega, E., 2009.: Characterization of hailstone size spectra in hailpad networks in France, Spain and Argentina
Atmospheric Research, 93., 641.- 654.

- Schleusener, R.A., Jennings, P.C., 1960.: An energy method for relative estimates of hail intensity
Bulletin of the American Meteorological Society, 41., 372.-376.
- Schiesser, H.H., 1988.: Fernkundung von Hagelschaeden mittels Wetterradar
Remote Sensing Series, 14., Universität Zürich, Schweiz, 199 str.
- Seino, H., 1985.: Experimental study on crop damage by hail
Part I: The effect of simulated hailfall on crop yield
Journal of Agricultural Meteorology, 40., 361.-368.
- Sioutas, M., Meaden, T., Webb, J.D.C., 2009.: Hail frequency, distribution and intensity in Northern Greece
Atmospheric Research, 93., 526.-533.
- Storch, H., Zwiers, F.W., 2004.: Statistical analysis in climate research
Cambridge University Press, United Kingdom, 484 str.
- Summers, P. W., 1968.: Soft hail in Alberta hailstorms
Proceedings of the International Conference on Cloud Physics, Toronto, Canada, 455.-459.
- Svabik, O., 1989.: Review of meteorological aspects on hail defence activities in Austria
Theoretical and Applied Climatology, 40., 247.-254.
- Tondout, J. L., Allard, O., Treil, A., Mezeix, J. F., 1983.: Grele-degats 1982.
Relations entre les paramètres physiques des chutes de grele et les dégats occasionnés à la vigne
GNEFA, Valence, France, Rapport Technique, 47., 53 str.
- Towery, N.G., Changnon, Jr., S.A., 1974.: A review of hail sensors
Journal of Weather Modification, 6., 304.-317.
- Ulbrich, C. W., 1983.: Natural variations in the analytical form of the raindrop size distribution
Journal of Climate Meteorology, 22., 1764.-1775.
- Vento, D., 1976.: The hailpad calibration for Italian hail damage documentation
Journal of Applied Climatology, 15., 1018.-1022.
- Webb, J.D.C., Elsom, D.M., Meaden, G.T., 1986.: The TORRO hailstorm intensity scale
Journal of Meteorology, 11., 337.-339.
- WMO, 1992.: International Meteorological Vocabulary, WMO, 784 str.
- WMO, 1995.: Meeting of experts to review the present status of hail suppression
Golden Gate National Park, South Africa, WMO Report, 33.
- Wojtiv, L., Renick, J. H., 1973.: Hailfall and crop damage in Alberta, Preprints, 8th Conference on Severe Local Storms, American Meteorological Society, Denver, CO, USA, Oct. 15-17, 138.-141.

Wong, R. K. W., Chidambaram, N., Cheng, L., English, M., 1988.: The sampling variations of hailstone size distributions
Journal of Applied Meteorology, 27., 254.-260.

Ziegler, C. L., Ray, P. S., Knight, N. C., 1983.: Hail growth in an Oklahoma multicell storm
Journal of the Atmospheric Sciences, 40., 1768.-1791.

7. ŽIVOTOPIS

Rođen sam 17.9.1952. godine u Varaždinu, gdje sam pohađao osnovnu školu i Gimnaziju. Diplomirao sam 1984. na Prirodoslovno – matematičkom fakultetu, Odjel: Fizika, struka: geofizika. Poslijediplomski studij geofizike upisao sam 2005. godine.

Od 1982. godine radim u Državnom hidrometeorološkom zavodu, a od 1984. do 2000. godine radim na mjestu voditelja Radarskog centra Varaždin. Kao viši stručni savjetnik radim od 2001. godine na području istraživanja, analize i kontrole podataka vezanih za grmljavinske oluje, te pojavu i karakteristike tuče.

Od 1985. godine sudjelujem s radovima na međunarodnim konferencijama i radionicama. Magistrirao sam 2008. godine s temom „Analiza pojave tuče u kontinentalnom dijelu Hrvatske“.

8. POPIS RADOVA

Izvorni znanstveni radovi u CC časopisima:

Počakal, D., 2003.: Comparison of hail characteristics in NW Croatia for two periods, Natural Hazards, 29., 543.-552.

Počakal, D. i Štalec, J., 2003.: Statistical analysis of hail characteristics in the hail-protected western part of Croatia using data from hail suppression stations, Atmospheric Research., 67.-68., 533.-540.

Počakal, D., Večenaj, Ž. i Štalec, J., 2009.: Hail characteristics of different regions in continental part of Croatia based on influence of orography, Atmospheric Research, 93., 516.-525.

Počakal, D., 2011.: Hailpad data analysis for continental part of Croatia Meteorologische Zeitschrift, 20., 4., 441.-447.

Ostali radovi u drugim časopisima:

Počakal, D. i Lipovšćak, B., 1988.: Određivanje veličina zrna tuče Zbornik radova JUKEM, Split, 1061.-1067.

Počakal, D., 2003.: Metode i rezultati ocjene uspješnosti djelovanja sustava obrane od tuče Hrvatski meteorološki časopis, 38., 35.-50.

Znanstveni skupovi:

Matvijeve, M., Peti, D. and Počakal, D., 1993.: Case study: Heavy hailstorm on August 18th 1991., Symp. „Hail and Consequences“, Krems, Austria, str. 43.

Matvijeve, M., Peti, D. and Počakal, D., 1994.: Comparative analysis of operational hail suppression activities in Croatia, 6th WMO Conf. on Wea. Mod., Paestum, Italy, 63.-66.

Počakal, D., 1985.: Statistička analiza kretanja konvektivnih oblačnih ćelija na području regije Varaždin, I Jugoslovenska konferencija o modifikaciji vremena, Tara, YU, 247.-258.

Počakal, D., 1987.: The hailstone kinetic energy determination and comparison with radar parameters, Proc. – 2nd Inter. Symp. on hail Suppression – on behalf of the working community Alps-Adriatic, Ljubljana, Slovenia, str. 51.

Počakal, D., 1991.: Utjecaj zabrane OKL-a na promjer zrna tuče, II Jugoslovenska konferencija o modifikaciji vremena, Mavrovo, Makedonija, 240.-246.

Počakal, D., 1993.: The influence of air traffic control ban on the hailstone diameter, Symp. „Hail and Consequences“, Krems, Austria, str. 43.

Počakal, D., 1994.: The relative frequency distribution of diameter and duration of hailfalls in Croatia, 6th WMO Conf. on Wea. Mod., Paestum, Italy, 127.-129.

Počakal, D.; 1998.: Geographical distribution of days with hail in northern Croatia I, 2th Eu. Conf. on App. Climat., Vienna, Austria, str. 215.

Počakal, D.; 1999.: Geographical distribution of days with hail in northern Croatia II, 7th WMO Conf. on Wea. Mod., Chiang Mai, Thailand, 437.-440.

Počakal, D., 2000.: Comparison of hail characteristics in hail protected western part of Croatia in two separate periods, 8th Int. Symp. on Natural and Technological Hazards, Tokushima, Shikoku, Japan, str. 53.

Počakal, D. i Štalec, J., 2003.: Statistical analysis of hail characteristics in the hail-protected western part of Croatia using data from hail suppression stations, 8th WMO Sci. Conf. on Wea. Mod., Casablanca, Morocco, 303.-306.

Počakal, D. i Štalec, J., 2004.: Preliminary statistical analysis of hail characteristics parameters measured with hailpads in the hail-protected western part of Croatia, ECSS, Leon, Spain, str. 7.

Počakal, D., 2005.: Influence of orography on hail characteristics in the continental part of Croatia, ICAM/MAP, Zadar, Hrvatska, poster E.21., str. 104.

Počakal, D. i Lipovšćak, B., 2006.: Analysis of occurrence and maximal parameters values of hail in the continental part of Croatia. ECAC, Ljubljana, Slovenia, poster 226.

Počakal, D. i Večenaj, Ž., 2007.: Hail characteristics of different regions in continental part of Croatia based on influence of orography, ECSS, Trst, Italy, poster 07.25.

Počakal, D. i Štalec, J., 2007.: Five-year results and statistical analysis of hail parameters for two different seeded areas in western part of Croatia measured with hailpads, ECSS, Trst, Italy, poster 09.11.

Počakal, D.; 2008.: Hail climatology in the continental part of Croatia – changes in some parameters, EMS/ECAC, Amsterdam, the Netherlands, poster 42.

Počakal, D. i Lipovšćak, B., 2009.: Occurrence and characteristics of hail in continental part of Croatia, EGU, Wien, Austria, poster 20.

Počakal, D., 2009.: Hailpad data analysis for continental part of Croatia, ECSS, Landshut, Germany, str. 20.

Počakal, D. i Vrljićak, Z., 2010.: Application of hailpad data by construction of anti-hail nets in Croatia, EMS/ECAC, Zurich, Swiss, str. 6.

Počakal, D. i Večenaj, Ž., 2011.: EOF analysis of the hailpad data for the polygon in Croatia, ECSS 2011, Palma de Mallorca, Spain, extended abstract and poster 35.

Ostalo:

Počakal, D., 2002.: Projekt ocjene djelovanja OT-a u Hrvatskoj pomoću poligona tučomjera, DHMZ, Zagreb, 30 str.

Počakal, D. i Vučetić, V., 2004.: Analiza pojave tuče na području Hrvatske, projekt DHMZ, Zagreb, studija, 51 str.

Počakal, D., Godišnja izvješća o karakteristikama tuče izmjerene pomoću tučomjera za 2003., 2004., 2005., 2006., 2007., 2008., 2009., 2010. i 2011. godinu, DHMZ, Zagreb.

9. PRILOZI

9.1. Naputak o postavljanju i rukovanju s tučomjerom na mjernom mjestu

Tijekom sezone 2001. godine, tehničke ekipe radarskih centara (RC) na svom području postavljaju tučomjere na sve lansirne (LP) i generatorske postaje (GP) te na sve glavne meteorološke postaje (GMP) u kontinentalnom dijelu Hrvatske. Postavljanje tučomjera na tim postajama izvršilo se poštujući sljedeće uvjete i postupke.

- da tučomjer nije zaklonjen nikakvim objektom u svojoj blizini
- da je vidljiv poslužitelju na postaji
- da ne smeta raketaru (poslužitelju) u njegovoj primarnoj djelatnosti
- na odabranom mjestu stalak montirati stabilno tako da gornja ploča bude horizontalna
- orijentirati stalak tako da otvoreni dio bude okrenut prema jugu
- odrediti koordinate pomoću GPS-a ili karte
- bojom na ploči stalka napisati broj tučomjera (broj RC-a + broj postaje)
- obučiti poslužitelja rukovanju
- poslati podatke (broj i koordinate) u DHMZ

Dolaskom na postaju, prije nailaska grmljavinskog nevremena, poslužioc tučomjera stavlja ploču u stalak tako da je bočna oznaka na ploči vidljiva. Kod stavljanja i vađenja ploče potrebno je paziti da se ne ošteti gornja površina. U slučaju da nije bilo tuče prije odlaska s postaje, poslužioc vadi i sprema ploču. U slučaju padanja tuče bilježi se vrijeme padanja, javlja se radarskom centru, mijenja oštećenu ploču novom i upisuje podatke o padanju tuče.

Obrada oštećenih ploča tučomjera, tj. mjerenje promjera tragova tuče na ploči, radi se ručno. Mjerenje svakog traga tuče upisuje se u odgovarajući formular, a nakon obrade cijele ploče, izmjerene vrijednosti promjera traga upisuju se u računalni program koji je izrađen za potrebe projekta.

Uz podatak o samom intenzitetu tuče u neposrednoj blizini tučomjera skupljaju se i podaci o intenzitetu štete na biljnim kulturama kako bi se dobila veza između izmjerenog intenziteta (kinetičke energije) tuče na tom mjestu i stupnja oštećenja raznih biljnih kultura. U slučaju štete na biljnim kulturama koje se nalaze u radijusu od 50 m, a i do 100 m od mjernog instrumenta- tučomjera, članovi terenske ekipe zajedno s poslužiteljem tučomjera određuju vrstu i fenofazu biljne kulture te intenzitet oštećenja, koji upisuju u formular nazvan „Izvešće o šteti“, koju onda zajedno s tučomjerom šalju na obradu. Primjer ispunjenog izvješća o šteti može se vidjeti na slici 56. Kako biljne kulture u svojim fazama razvoja (fenofaza) nisu jednako osjetljive, za potrebe lakšeg određivanja terenskog osoblja i samih poslužitelja tučomjera, napravljen je pojednostavljeni pregled fenofaza najvažnijih biljnih

kultura u kontinentalnom dijelu Hrvatske (tablica 6.). Na primjeru izvješća o šteti vidi se da je na postaji 114 Radarskog centra Bilogora, tuča na udaljenosti do 50 m sjeverno od tučomjera napravila štetu od 30 % na kukuruzu koji se nalazio u svom ranom stadiju. Svakom takvom podatku u računalnoj bazi dodaju se podaci o broju zrna i kinetičkoj energiji (tablica 9.).

✓



REPUBLIKA HRVATSKA
DRŽAVNI HIDROMETEOROLOŠKI ZAVOD
ODJEL ZA OBRANU OD TUČE

cct nt/Q

IZVJEŠĆE O ŠTETI

DATUM: 10.06.2009. RADARSKI CENTAR: BILGORA
LP: VUKOVIĆE (114) BROJ TUČOMJERA: 3114
VJETAR- smjer: PAK (3) brzina: PAK
KIŠA - opisno: PAK

PROCJENA ŠTETE (0 - 50 m)

SMJER	UDALJENOST (m)	BILJNA KULTURA	FENOFAZA	%
N	0 - 50	KUKURUZ	RANI STAD.	30 %
W	0 - 50	PŠENICA	MLIJEČNI ST.	40 %
S				
E				

PROCJENA ŠTETE (51 - 100 m)

SMJER	UDALJENOST (m)	BILJNA KULTURA	FENOFAZA	%
N	50 - 100	KUKURUZ	RANI ST.	30 %
W	50 - 100	PŠENICA	MLIJEČNI ST.	40 %
S				
E				

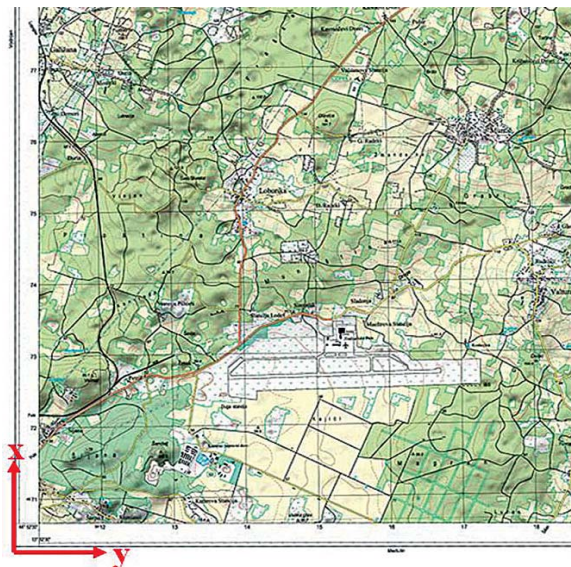
UKUPNO ZAHVAĆENA POVRŠINA:

Primjedbe:

Slika 56. Primjer ispunjenog izvješća o šteti na postaji 114 Radarskog centra Bilogora; tuča je 10. lipnja 2009. godine oštetila kukuruz 30%, a pšenicu u mliječnom stadiju oko 40 %

9.2. Gauss-Krügerova projekcija

Gauss-Krügerova projekcija spada u grupu valjkastih ili cilindričnih projekcija, gdje se točke elipsoida preslikavaju na plašt valjka. Upotrebljava se za izradu topografskih karata za relativno uska područja (3° do 6° geografske širine) uz zadani meridijan, tzv. zone, zbog smanjivanja točnosti određivanja koordinata na većim udaljenostima istočno ili zapadno od meridijana (sl. 57.). Koordinate u takvim sustavima izražavaju se u kilometrima, a ne u stupnjevima. Teritorij Republike Hrvatske podijeljen je na dva pravokutna koordinatna sustava, tj. dvije zone, (5. i 6. zona) računajući od 0 meridijana. Položaj neke točke definiran je udaljenošću od ishodišne točke po x i y osi na topografskim kartama koje imaju iscrtanu Gauss-Krüger mrežu (sl. x). U svakoj zoni je središnji (15° ili 18°) meridijan os x koordinatnog sustava s pozitivnim smjerom na sjever, a os y je ekvator.



Slika 57. Prikaz topografske karte u Gauss-Krügerovoj projekciji

9.3. Mann-Kendall-ov neparametarski test za linearni trend

Za procjenu trenda prosječnog trajanja dužine padanja tuče na području kontinentalne Hrvatske korišten je Mann-Kendalov neparametarski test (npr. Mitchell i sur., 1966; Gilbert, 1987). To je metoda koja omogućuje ocjenu statističke signifikantnosti linearnog trenda. Za testiranje se formiraju nizovi sljedova (rangiranih podataka). Statistički koeficijent p dobije se tako da se uspoređi vrijednost prvog člana niza x_i sa sljedećim članom niza i sve tako do N -tog. Nakon toga zbroji se sljedeći broj iz izraza čija je vrijednost veća od x_i , te označi s n_i . Postupak se ponavlja sve do x_{N-1} , odnosno n_{N-1} . Zbrojem svih vrijednosti dobije se p :

$$p = \sum_{i=1}^{N-1} n_i \quad (20)$$

Koeficijent τ izveden je od N i p u jednadžbi (21):

$$\tau = \frac{4p}{N(N-1)} - 1 \quad (21)$$

Usporedbom ovih vrijednosti dobiva se relacija za test signifikantnosti:

$$(\tau)_t = 0 \pm t_g \sqrt{\frac{4N+10}{9N(N-1)}} \quad , \quad (22)$$

gdje je t_g točka željene vjerojatnosti Gaussove normalne raspodjele.