UDK 551.43:550.36
Originalni znanstveni članak

ENTROPIJA I EVOLUCIJA RELJEFA

Mirjanka LECHTHALER — Beč*

SAŽETAK. U članku su predočene dvije definicije entropije reljefa. Prva proizlazi iz osnovnih zakona termodinamike i temelji se na kompletnoj analogiji između toplinskog sustava s varijablom temperatura i sustava reljef s varijablom apsolutna visina. Druga, na osnovi Boltzmannove jednadžbe (tj. Shannonove jednadžbe iz teorije informacija), računa entropiju reljefa s pomoću statističke vjerojatnosti pojavljivanja pojedinih apsolutnih visina. Obje definicije opisuju reljef kao sustav u evoluciji, čija entropija raste. Nizine, po postanku starije formacije s malom aktivnošću sila, imaju veću entropiju od planina koje su mlađeg postanka i očituju se relativno velikom aktivnošću sila.

1. UVOD

U neprestanom dinamičkom procesu djelovanja dviju osnovnih geomorfoloških sila gradi se i oblikuje reljef (topografska ploha) Zemlje. Endogene sile koje rezultiraju tektonskim, vulkanskim i seizmičkim pojavama dolaze iz njene unutrašnjosti i uzrokuju pokrete Zemljine kore, stvarajući makrooblike. U procesima trošenja i premještanja, odnošenja i taloženja, pod utjecajem egzogenih sila nastalih djelovanjem privlačne sile Sunca i Mjeseca na vodene i zračne mase, pojavljuju se »deformacije« postojećih oblika reljefa.

Reljef Zemljine kore koji se sastoji od pramasa, stabilnih kontinentalnih ploča, labilnih ploča starih orogena, te planinskih sustava u području mlađih geosinklinala (Pesci, 1978), jedan je dinamički sustav, čija je neovisna kontinuirana varijabla apsolutna visina točaka poznatog položaja.

Teorija sustava i teorija modela omogućuju da se topografska ploha Zemlje prikaže kao termodinamički model, točnije kao fenomenološko-termodinamički odnosno statističko-termodinamički model. Svaki na svoj način opisuje procese promjena oblika reljefa, definira entropiju reljefa i prikazuje njegovu evoluciju. U radu će s pomoću entropije biti predočena evolucija reljefa, opisana u oba modela.

* Dr. Mirjanka Lechthaler, TU Wien, Institut für Kartographie und Reproduktionstechnik, A-1040 Wien, Karlsg. 11.

2. DEFINICIJA ENTROPIJE RELJEFA

Tijekom geomorfoloških procesa, topografska ploha Zemlje mijenja oblik i prelazi iz jednog evolucijskog stanja u drugo. U sklopu teorije sustava određeno stanje opisano je fiksnim vrijednostima varijabla, ima svoju vjerojatnost pojavljivanja i nemoguće ga je predskazati u ovisnosti o tijeku vremena. Funkcija koja kvantitativno daje iskaz o stanju sustava je njegova entropija.

2.1. *Fenomenološko-termodinamički modeli*

Svako stanje sustava ima određenu (diskretnu) vrijednost energije, kao moguću promjenljivu varijablu koja ga obilježuje. Energiju se ne može proizvesti niti je se može uništiti. Ona se može razmjenjivati u procesima kao prijelaznim stanjima sustava, i to primanjem odnosno predajom energije.

Sljedeća varijabla koja obilježuje sustav (i ukazuje na međusobnu povezanost i međuovisnost svih prirodnih pojava) jest entropija. Entropija S je termodinamička veličina, koja je preko apsolutne temperature T funkcionalno vezana s toplinskom energijom Q (Planck, 1945.):

$$dS = T\,dQ. \tag{1}$$

Leopold i Langbein (1962.) uspoređuju i opisuju stanja i procese topografske plohe Zemlje zakonitostima termodinamike. Na temelju razdiobe energije uspostavljaju analogiju između temperature plina u jednom toplinskom polju i apsolutnih visina reljefa, tj. između toplinske energije i mehaničke energije pojedinih čestica topografske plohe Zemlje. Sile koje djeluju tijekom procesa, izazivajući promjene oblika reljefa, u konačnosti teže k uspostavljanju najvjerojatnijeg stanja — stanja ravnoteže, u kojemu je energija ravnomjerno raspoređena, a entropija poprima svoj maksimalni iznos.

Spomenutu analogiju potvrđuje i proširuje Scheidegger (1964, 1967, 1970.) u svojim radovima koristeći zakon o održavanju energije i zakon o povećanju entropije. U stanju ravnoteže autor uspoređuje promjenu količine topline dQ s promjenom mase topografske plohe Zemlje dM, odnosno termodinamičku entropiju s entropijom reljefa.

$$\begin{gathered} T \leftrightarrow h, \\ dQ = C\,dT \leftrightarrow dM = C'\,dh, \\ dS = dQ/T \leftrightarrow dS = dM/h, \\ S = C \int_T dT/T \leftrightarrow S = C' \int_h dh/h, \end{gathered} \tag{2}$$

gdje su C i C′ konstante analogne koeficijentu toplinskoga kapaciteta.

Za dokazivanje kompletne analogije Scheidegger (1967.) uspoređuje dalje toplinske i mehaničke utjecaje na spomenute sustave; naime, unutarnju energiju U termodinamičkog sustava koja nastaje promjenom količine topline dovedene u sustav radom W i unutarnju energiju u sustavu reljef koja ovisi o promjeni količine mase izazvane učinjenim radom:

$$dU = dQ + dW \leftrightarrow dU = dM + dW. \tag{3}$$

[1] Rudolf Clausius (1822—1888) uvodi ekstenzivnu varijablu entropiju u termodinamiku i daje joj jedinicu energija/stupanj temperature (Falk i Ruppel, 1976.).

Nadalje, autor uspoređuje rad W kroz pritisak D koji djeluje u volumenu V idealnog plina, odnosno na određenoj duljini L isječka topografske plohe Zemlje:

$$D = C\frac{T}{V} \leftrightarrow D = C'\frac{h}{L},$$

$$W = -\int_V D\,dV,$$

$$W = -C\int_V \frac{T}{V}\,dV \leftrightarrow W = -C'\int_L \frac{h}{L}\,dL. \tag{4}$$

Rad učinjen pritiskom u termodinamici rezultira toplinom, a u sustavu reljef rezultira transportom masa.

Izloženu analogiju potkrepljuje Scheidegger (1967.) primjenom zakonitosti Carnotovoga kružnog procesa na reljef i ukazuje na održavanje energije i količine mase u procesima erozije i akumulacije. Pri ireversibilnoj realizaciji procesa povećava se entropija (Falk i Ruppel, 1976.).

2.2. *Statističko-termodinamički modeli*

Pojam entropije izvodi Boltzmann (1897.) iz drugog zakona termodinamike, kako bi opisao stanje idealnog plina, čije se molekule s vjerojatnošću p_i nalaze u i-tom položaju faznog prostora. Prema Jossu (1977.) postoji jaka međuovisnost između entropije sustava u određenom stanju i vjerojatnosti da se taj sustav u tom stanju nađe. Entropija je mjera vjerojatnosti. Sustav će biti podvrgnut procesima koji mijenjaju njegova stanja tako dugo dok ne dođe do stanja ravnoteže, odnosno dok entropija ne postigne svoj maksimum. Boltzmannov izraz za entropiju S glasi:

$$S = k \ln p, \tag{5}$$

gdje je k konstanta, a p vjerojatnost.

Entropija zatvorenog makrosustava, koji se sastoji od skupa neovisnih mikrosustava, predočena je izrazom

$$S_{1,2..} = S_1 + S_2 + \ldots + S_n = k\sum_{i=1}^{n} \ln p_i, \tag{6}$$

gdje je p_i vjerojatnost x_i-tog stanja neovisnog S_i-tog (od ukupno k) mikrosustava.

Koristeći Sterlingovu aproksimaciju (Lechthaler-Zdenković i Scheidegger, 1989.), za logaritam vjerojatnosti proizlazi:

$$\ln p_n(x_i) = \text{const} - \sum_i x_i \ln x_i - \sum_i \ln\sqrt{2\Pi x_i}, \tag{7}$$

odnosno, za zatvoreni sustav s dostatno velikim brojem stanja x_i entropija će biti:

$$S = k \cdot \ln p = \text{const} - k\sum x_i \ln x_i. \tag{8}$$

Tu statističku definiciju entropije primjenjuju Shannon i Weaver (1949.) u teoriji informacija. Izvor informacija (diskretnog ili kontinuiranoga karaktera), koji raspolaže izborom elementarnih znakova i određenih pravila za njihovo povezivanje, posjeduje vlastitu entropiju. Ona ovisi o vjerojatnosti p_i pojavljivanja pojedinih znakova.

Vjerojatnost jednog znaka diskretnog izvora jednake vjerojatnosti $p_1 = p_2 = \ldots = p_n$ je:

$$p_i = 1/n. \tag{9}$$

Zbroj vjerojatnosti diskretnog izvora znakova različite vjerojatnosti $p_1 \neq p_2 \neq \ldots \neq p_n$ je:

$$\sum_{i=1}^{n} p_i = 1. \tag{10}$$

Entropija diskretnog izvora prema Shannonu i Weaveru (1949.), analogno Boltzmannovom izrazu (8) je:

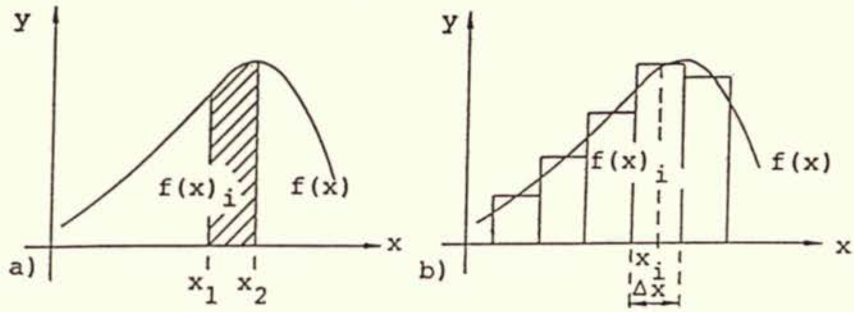
$$S = -\sum_{i=1}^{n} p_i \,\mathrm{ld}\, p_i \qquad \text{(bit)}. \tag{11}$$

Vjerojatnosti kontinuiranog izvora razdijeljene su na vrijednosne intervale kontinuiranog znaka $x_i = (x_1, x_2)$ prema funkciji vjerojatnosti $f(x)$ (sl. 1):

$$p_i \{x_1 < x < x_2\} = \int_{x_1}^{x_2} f(x)\, dx, \tag{12}$$

gdje je $f(x) > 0$, a:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} f(x)\, dx = 1. \tag{12a}$$



Slika 1. a: Funkcija razdiobe vjerojatnosti kontinuirane varijable
b: Diskretizacija kontinuirane varijable

Entropija kontinuiranog izvora je prema Shannonu i Weaveru (1947.):

$$S = -\int_{-\infty}^{+\infty} f(x)\,\mathrm{ld}\, f(x)\, dx \qquad \text{(bit)}. \tag{13}$$

Ako je funkcija vjerojatnosti f(x) nepoznata, potrebno je provesti diskretizaciju kontinuirane varijable. Odabrani korak diskretizacije je Δx (sl. 1). U tom slučaju entropija je prema Pavliću (1970.) dana izrazom:

$$S = S_{apr} + \mathrm{ld}\, \Delta x \qquad \text{(bit)}, \tag{14}$$

gdje je S_{apr} aproksimacija entropije kontinuiranog sustava:

$$S_{apr} = -\sum_{i=1}^{n} f(x)_i \,\Delta x \,\mathrm{ld}\, f(x)_i \,\Delta x \quad \text{(bit)}, \tag{15}$$

$f(x)_i \,\Delta x$ je vjerojatnost, odnosno frekvencija pojavljivanja vrijednosti u intervalu Δx (sl. 1).

Prema Pavliću (1970.) i Maseru (1973.) entropija ima sljedeće značajke:

$S > 0$ — entropija je pozitivna veličina jer su pojedine vjerojatnosti pozitivne: $p_i > 0, f(x) > 0$;

$S = 0$ — iznos entropije jednak je nuli kada jedan znak dolazi sa sigurnošću, naime njegova vjerojatnost jednaka je jedinici (sve ostale su nula!) [izraz (10) i (12a)];

$S_{max} = \mathrm{ld}\, n$ — entropija je maksimalna kada svi znakovi dolaze s jednakom vjerojatnošću!

2.2.1. *Entropija reljefa*

Pri kraju šezdesetih godina nalaze se u literaturi prvi pokušaji primjene teorije informacija odnosno teorije komunikacija u kartografiji (Sukhov, 1967.). Kartografski prikaz promatra se kao medij prijenosa kartografske informacije o diskretnim ili kontinuiranim općegeografskim i tematskim objektima. Informacija je pohranjena u kartografskim znakovima.

Zdenković (1985.) određuje entropiju prikaza reljefa izohipsama u nizu topografskih karata mjerila 1 : 25 000, 1 : 50 000, 1 : 100 000 i 1 : 200 000 (TK 25, TK 50, TK 100 i TK 200) koristeći zakone teorije informacija. U tu svrhu izabrana su 33 reprezentativna uzorka veličine 24 km² triju reljefnih oblika (kartografski princip): ravnice, gorja, planine u tri reljefna tipa (geomorfološki princip): Panonsko područje, područje mlađe nabranoga gorja, gromadno gorje. Topografska ploha Zemlje je izvor informacija o visinama kontinuiranoga karaktera.

Za svaki isječak (u sva četiri mjerila) provedeno je određivanje razdiobe vjerojatnosti pojavljivanja apsolutnih visina h. Njihove relativne frekvencije $f_{i_{rel}}$ pokazane su histogramima (sl. 2 i sl. 3).

Ispitivanja razdiobe visina ne vode postojećim, teoretski poznatim (opisanim) razdiobama, te se entropija ne može odrediti Shannonovim izrazom (13). Stoga je reljef (kao sustav visina) potrebno podvrgnuti diskretizaciji. To je već provedeno u kartografskom prikazu, gdje primijenjena ekvidistancija Δh znači korak diskretizacije.

Entropija reljefa dana je izrazom (14), gdje je aproksimacija entropije reljefa određena iz kartografskog prikaza svakog isječka u sva četiri mjerila izrazom (15):

$$S_{apr} = -\sum_{i} f_{i_{rel}} \,\mathrm{ld}\, f_{i_{rel}} \quad \text{(bit)}, \tag{16}$$

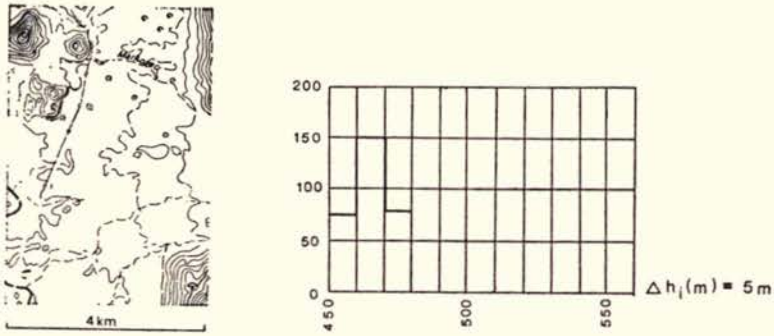
gdje je $\sum_{i} f_{i_{rel}} = 1$.

Ispitivanja rezultata određivanja entropije reljefa iz kartografskih prikaza reljefa izohipsama kazuju da je entropija reljefa kao kontinuiranog sustava

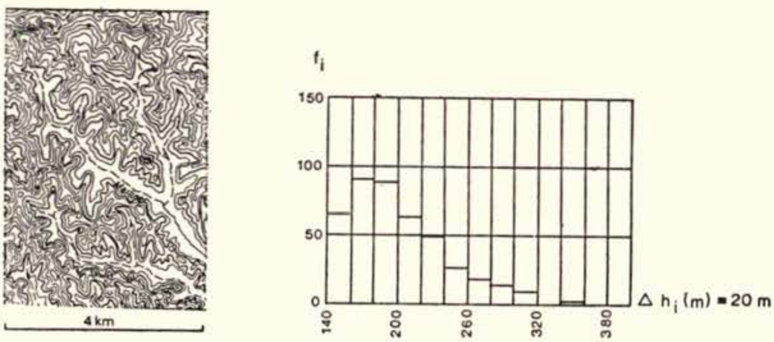
Tablica 1. Popis topografskih karata s kojih su uzeti uzorci

Tip	oblik	Mjerilo / Područje	NAZIV TOPOGRAFSKE KARTE 1: 25 000	1: 50 000	1:100 000	1:200 000
Panonsko područje	nizine	Pokuplje	Zagreb 320-3-4	Zagreb 320-3	Zagreb 320	Zagreb 4616
		Podravlje	Varaždin 271-2-3	Varaždin 271-2	Varaždin 271	Zagreb 4616
		Posavlje	N.Gradiška 373-3-2	N.Gradiška 373-3	N.Gradiška 373	Banja Luka 4517
	gorje	Hrvat.zagorje	Ptuj 270-4-4	Ptuj 270-4	Ptuj 270	Zagreb 4616
		Bilo gora	Virovitica 323-1-4	Virovitica 323-1	Virovitica 323	Bjelovar 4617
	planine	Psúnj	N.Gradiška 373-2-2	N.Gradiška 373-2	N.Gradiška 373	Banja Luka 4517
		Papuk	Podr.Slatina 324-3-3	Podr.Slatina 324-3	Podr.Slatina 324	Pečuj 4618
		Medvednica	Zagreb 320-2-2	Zagreb 320-2	Zagreb 320	Zagreb 4616
Područje mladjeg nabiranja – Dinaridi	zaravni	Zapadna Istra	Rovinj 366-4-3	Rovinj 366-4	Rovinj 366	Rijeka 4514
		Ravni kotari	Zadar 469-4-4	Zadar 469-4	Zadar 469	Zadar 4415
		Krka (Šibenik)	Šibenik 520-2-2	Šibenik 520-2	Šibenik 520	Split 4416
	polja	Gacko polje	Gospić 419-2-3	Gospić 419-2	Gospić 419	Gospić 4515
		Ličko polje	Gospić 419-4-3	Gospić 419-4	Gospić 419	Gospić 4515
		Krbavsko polje	Bihać 420-3-4	Bihać 420-3	Bihać 420	Bihać 4516
Alpe	gorje	Kalnik	Koprivnica 272-3-3	Koprivnica 272-3	Koprivnica 272	Bjelovar 4617
		Ivanščica	Varaždin 271-3-2	Varaždin 271-3	Varaždin 271	Zagreb 4616
Dinaridi		Petrova gora	Karlovac 273-2-3	Karlovac 273-2	Karlovac 273	Bihać 4516
		Žumberak	Novo Mesto 319-4-1	Novo Mesto 319-4	Novo Mesto 319	Ljubljana 4615
		Mala Kapela	Ogulin 369-4-2	Ogulin 369-4	Ogulin 369	Gospić 4515
		Ličko gorje	Gospić 419-4-2	Gospić 419-4	Gospić 419	Gospić 4515
		Slunjska površ	Bihać 420-3-2	Bihać 420-3	Bihać 420	Bihać 4516
Alpe	planine	Karavanke	Tolmin 266-2-2	Tolmin 266-2	Tolmin 266	Trst 4614
		Golte	Ljubljana 268-2-1	Ljubljana 268-2	Ljubljana 268	Ljubljana 4615
Dinaridi		Velebit	Rab 418-2-4	Rab 418-2	Rab 418	Gospić 4515
		Dinara	Drvar 471-4-4	Drvar 471-4	Drvar 471	Split 4416
		Biokovo	Omiš 572-2-2	Omiš 572-2	Omiš 572	Makarska 4317
		Učka	Rijeka 367-1-4	Rijeka 367-1	Rijeka 367	Rijeka 4514
		Risnjak	Delnice 368-1-1	Delnice 368-1	Delnice 368	Gospić 4515
	otoci	Krk	Delnice 368-3-1	Delnice 368-3	Delnice 368	Gospić 4516
		Kornat	Biograd 519-2-3	Biograd 519-2	Biograd 519	Zadar 4415
		Brač	Omiš 572-1-3	Omiš 572-1	Omiš 572	Makarska 4317
Gromadno gorje	planine	Ohrid	Ohrid 780-4-3	Ohrid 780-4	Ohrid 780	Bitola 4121
		Pohorje	Celje 269-2-1	Celje 269-2	Celje 269	Ljubljana 4615

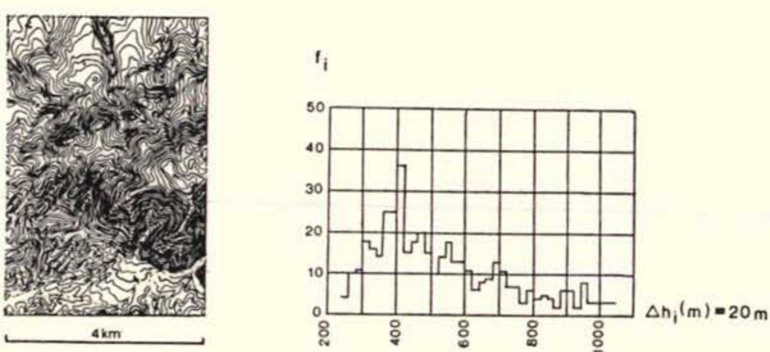
Nizine



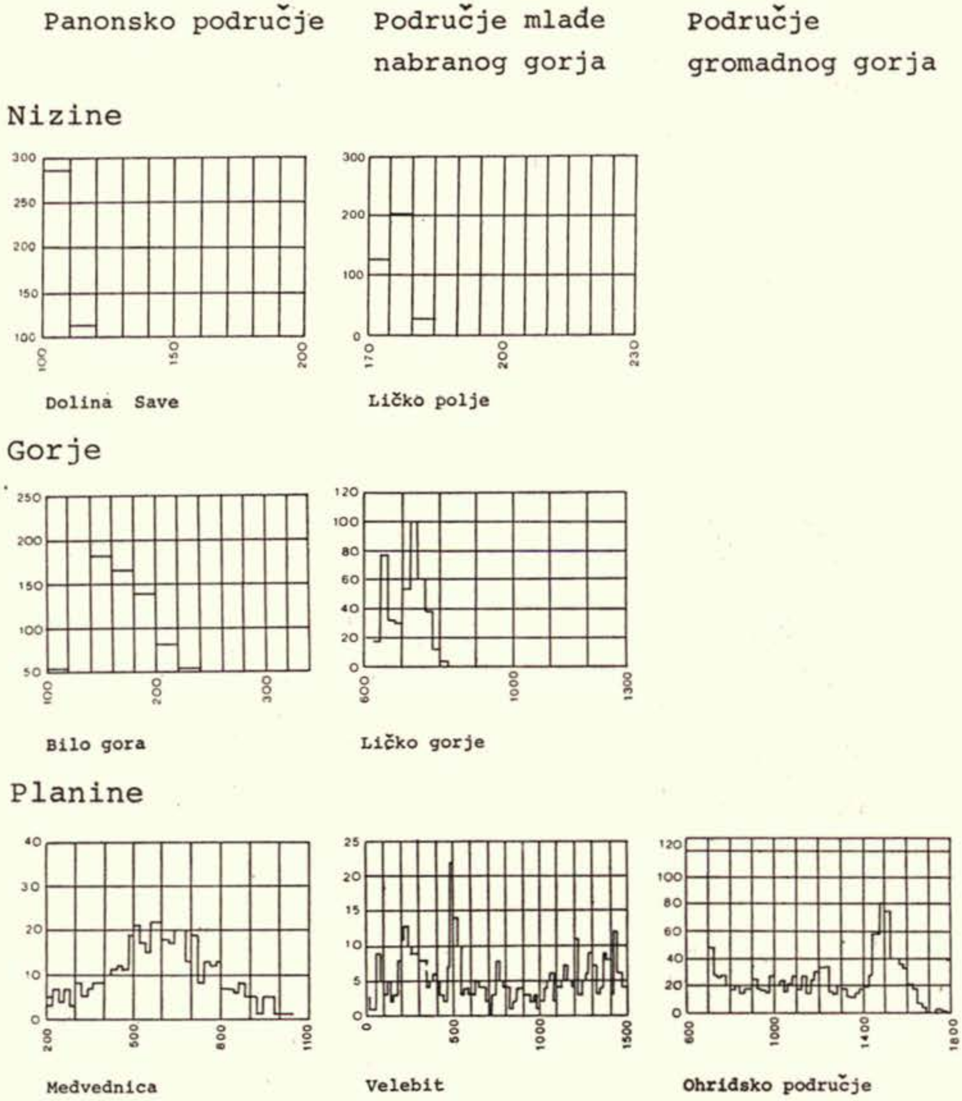
Gorje



Planine



Slika 2. Histogrami razdioba visina (Uzorci prikaza reljefa uzeti su iz TK 100. Veličina uzorka je 24 km²).



Slika 3. Usporedba razdioba visina za odabrane oblike i tipove reljefa

ovisna samo o razdiobi visina a ne o koraku diskretizacije, tj. o danom mjerilu prikaza [izraz (14)].

Da bi se tako dobivena entropija za određene oblike i tipove reljefa mogla međusobno uspoređivati, potrebno ju je normirati na unaprijed zadani broj izohipsa — npr. 100 i na odabranu maksimalnu visinu h_{max} [izraz (17)].

$$S_n = S_{apr} \Delta h \frac{h_{max}}{h} \frac{100}{h} \tag{17}$$

gdje je $h/\Delta h$ broj izohipsa.

Iznosi entropije reljefa dobiveni prema zakonitostima teorije informacija ukazuju na granične vrijednosti. U tablici 2. pokazane su entropije ispitivanih oblika reljefa.

Tablica 2. Normirana entropija reljefa za pojedine oblike reljefa

Oblik reljefa	Normirana entropija
Nizine	16.0 — 11.5
Gorje	11.5 — 9.0
Planine	9.0 — 7.0

3. PRIKAZ EVOLUCIJE RELJEFA S POMOĆU NJEGOVE ENTROPIJE

U prethodnim izlaganjima obavljena je usporedba definicija entropije reljefa. Evolucija reljefa bit će pokazana na temelju vrijednosti entropije reljefa s pomoću obje definicije, za reljef kao otvoreni i kao zatvoreni sustav. Rezultati ispitivanja teže k zajedničkom zaključku.

3.1. *Reljef kao otvoreni sustav*

Na temelju izložene analogije temperatura i visina, razdioba temperature u otvorenom sustavu (npr. beskonačnom vodiču) koja proizlazi iz termodinamičkog izraza za difuziju, može se primijeniti na razdiobu visina reljefa (Scheidegger, 1970.):

$$\frac{\partial T}{\partial t} = q\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2}\right) \leftrightarrow \frac{\partial h}{\partial t} = q\left(\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2}\right) \qquad (18)$$

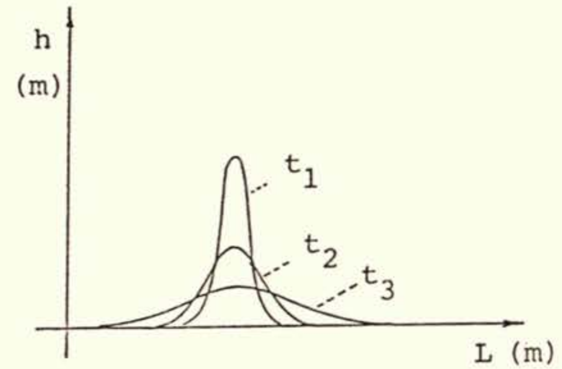
gdje je q konstanta, a h visina funkcionalno vezana s vremenom t, položajnim koordinatama x=L i y (L je »dužinski odsječak« reljefa) Rješenja difuznog izraza (18) za različita vremena različite su visine h [izraz (19)]:

$$\begin{aligned} h &= \frac{1}{(4\pi qt)^{1/2}} \exp\left(-\frac{L^2}{4qt}\right) \\ h &= \frac{1}{2} + \frac{1}{2}\operatorname{erf}\left(\frac{L}{(4qt)^{1/2}}\right), \end{aligned} \qquad (19)$$

koje uključene u izraz (2) daju iskaze o entropiji reljefa:

$$t_1 < t_2 < t_3 \rightarrow h_1 > h_2 > h_3 \rightarrow S_1 < S_2 < S_3. \qquad (20)$$

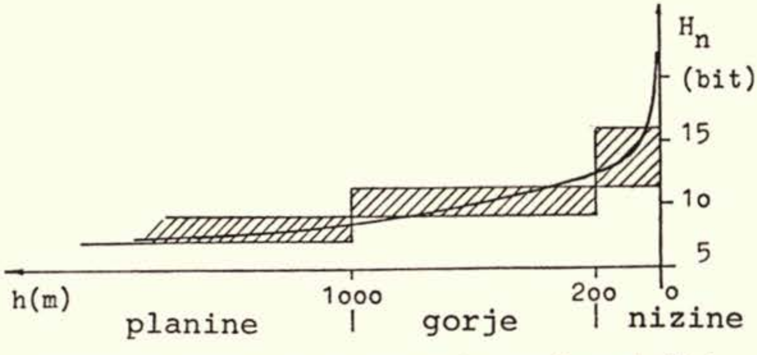
Izrazom (20) pokazana je promjena oblika topografske plohe Zemlje kao funkcija proteklog vremena, s rezultatom povećanja entropije za opadajuće visine (sl. 4). Maksimalnu entropiju postigla bi idealno uravnjena topografska ploha Zemlje.



Slika 4. Raspad idealne strukture planine (Scheidegger, 1970.)

3.2. *Reljef kao zatvoreni sustav*

Rezultati ispitivanja entropije reljefa kao zatvorenog sustava, na temelju statističkih podataka o visinama, također pokazuju tendenciju povećanja entropije za reljefne oblike s nižom apsolutnom visinom (tab. 2). Statistička entropija ovisi isključivo o frekvenciji pojavljivanja visina, a ne o njihovu relativno visinskom položaju (sl. 5). Maksimalnu entropiju postići će topo-



Slika 5. Prikaz entropije reljefa ovisno o njegovoj visini

grafska ploha Zemlje kada odstupanja od srednje vrijednosti visina budu minimalna, tj kada sve točke reljefa budu imale istu vrijednost pojavljivanja, odnosno istu visinu.

3.3. *Evolucija reljefa predočena njegovom entropijom*

Analogija temperature u termodinamičkom sustavu i visina u sustavu reljef, te analogija termodinamičke i statističke definicije entropije reljefa omogućuju opis evolucije reljefa s pomoću njegove entropije.

Scheidegger (1987.) daje kvantitativni indeks za Davisov kružni ciklus (Davis, 1912.), po kojemu planine predstavljaju reljef u »najmlađem« stadiju gdje djeluju sile s velikom aktivnošću, gorje predstavlja reljef u »zrelom«

stadiju gdje sile gube na intenzitetu i postupno dolaze u ravnotežu, te nizine kao reljef u »najstarijem« stadiju u kojemu su sile uravnotežene.

Taj se ciklus može naći i u opisu evolucije reljefa s pomoću entropije. Reljefni oblici — planine — najmlađeg razdoblja pokazuju najmanju entropiju, da bi tijekom vremena s nastupajućom ravnotežom sila (najmanjim erozijskim djelovanjem) entropija reljefa za uravnjena područja poprimila maksimalni iznos (tab. 2).

4. ZAKLJUČAK

Svi prirodni procesi teže stanju ravnoteže, u kojemu entropija postiže svoj maksimum. Antagonističko djelovanje sila u endogenim i egzogenim procesima dovodi masu Zemlje u stanje neravnoteže, u kojemu je energija neravnomjerno raspoređena. Postupno uspostavljanje ravnoteže posljedica je transporta masa, pričem nastaje glačanje reljefnih oblika. Izjednačenje visina za reljef kao otvoreni sustav bit će u konačnosti na jednoj nultoj erozijskoj razini (Scheidegger, 1970.), a za reljef kao zatvoreni sustav na razini sa srednjom visinom. Tako uspostavljena ravnoteža masa, sila i energije rezultira maksimalnim iznosom entropije. Taj zaključak potkrijepljen je određivanjem entropije za različite oblike reljefa na dva različita načina koristeći zakone termodinamike i zakone teorije informacija. Oblici reljefa s većom entropijom ukazuju na geomorfološko starije formacije.

5. LITERATURA

Boltzmann, L. (1897): Gesamtausgabe. Hrsg. v. ROMAN U. SEXL. (Erw. d. 1896—1898 bei A. Borth in Leipzig erschienenen Ausgabe). Band 1: Vorlesungen über Gastheorie, 265 pp. Graz: Akad. Druck/F. Vieweg u. Sohn, Braunschweig/ /Wiesbaden, 1981.

Davis, W. M. (1912): Die erklärende Beschreibung der Landformen; Deutsch von RÜHL, A.; 565 pp., Teubner, Leipzig.

Joss, G.(1947): Theoretical Physics; transl. from German by Ira M. Freeman. 748 pp., Blackie and Son, London.

Falk, G., W. Ruppel (1976): Engerie und Entropie, Eine Einführung in die Thermodynamik, 405 pp., Springer, Berlin/Heidelberg/New York.

Lechthaler, M., A. E. Scheidegger (1989): Entropy of landscape. Z. Geogr. N. F. 33,3 pp. 361—371, Berlin/Stuttgart.

Leopold, L. B. & W. B. Langbein (1972): The concept of entropy in landscape evolution. U. S. Geol. Surv. Prof. Paper 500 A: A1—A20.

Maser, S. (1973): Grundlagen der allgemeinen Kommunikationstheorie. 205 pp., Berliner Union GmbH, Stuttgart.

Pavlić, I. (1970): Statistička teorija i primjena. 343 pp., Tehnička knjiga, Zagreb.

Pesci, M. (1978): Geomorphologie, Atlas der Donauländer, Österreichisches Ost- und Südosteuropa Institut, Wien.

Planck, M. (1945): Treatise on Thermodynamics. Amer. Ed., 297 pp., Dover, New York.

Scheidegger, A. E. (1964): Some implications of statistical mechanics in geomorphology, Intern. Assoc. Sci. Hydrol., Bull., 9, №. 1, 12—16.

Scheidegger, A. E. (1967): A complete thermodynamic analogy for landscape evolution. Intern. Assoc. Sci. Hydrol., Bull., 12, №. 4, 56—62.

Scheidegger, A. E. (1970): Theoretical geomorphology. 2nd Ed., pp. 272—276, Springer, Berlin/Heidelberg/New York.

Scheidegger, A. E. (1987): Dynamik der Massenbewegungen., ZVD der Wildbach- und Lawinenverbung Österreichs, 51, H 105, Nov. 1987. pp. 3—23.
Shannon, C. E. & W. Weaver (1949): The Mathematical Theory of Communication. 117 pp., Univ. Illinois Press, Urbana.
Sukhov, V. I. (1967): Informatsionaya emkost karti. Entropiya, Geodeziya i Aerofotosemka, №. 4, 11—17.
Zdenković, M. (1985): Entropija prikaza reljefa izohipsama na nizu naših topografskih karata. Disertacija, 226 str., Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu.

ENTROPY AND EVOLUTION OF LANDSCAPE

This paper investigates the relation between the two definition of landscape entropy: The one — according to general thermodynamic principles on the base of the complete analogy between relief altitude in a landscape and temperature in an isobaric system, the other — based on the Boltzmann or Shannon respectively probability formula (Theory of Information), calculating the statistical probability of the presence of various relief heights. Both entropy definition describes the landscape as a system in evolution, whuse entropy increases. The high mountain as the »young« areas with high activity has a lower entropy that the plain »old-age« region with less activity.

Primljeno: 1992-12-15