

O PRIMJENI SUNČANE ENERGIJE U NAVODNJAVANJU¹

The utilization of solar energy for irrigation

IVAN PENZAR

Geofizički zavod „Andrija Mohorovičić”
Prirodoslovno-matematički fakultet,
Horvatovac bb, 10000 Zagreb, Hrvatska

MIROSLAV FANČOVIĆ[†]

Tehnološki fakultet Osijek
Trg Sv. Trojstva 3, 31000 Osijek, Hrvatska

Primljeno 10. studenog 1995, u konačnom obliku 29. studenog 1995.

Sažetak — Poljoprivredno područje Hrvatske prima u prosjeku dovoljno oborine tijekom cijele godine. Dulja beskišna razdoblja javljaju se samo povremeno. U radu se spominju atmosferske okolnosti koje ih uzrokuju i na potrebu navodnjavanja u takvim slučajevima. Prikazuje se energijski potencijal Sunčeva zračenja i meteorološke mogućnosti za primjenu tog zračenja u navodnjavanju. Opisuje se model M. Fančovića koji simulira rad postrojenja od pumpe do protoka vode. Pokazuje se da paneli s fotonaponskim sunčanim ćelijama mogu ljeti stajati vodoravno, a u proljeće i jesen trebalo bi ih usmjeriti prema jugu i nagnuti oko 40°. Prema klimatskim prilikama u Osijeku centrifugalne sunčane pumpe za vodu daju ljeti najveći protok od 16,8 m³ h⁻¹, dok bi zimi mogle dati protok vode od samo 6,5 m³ h⁻¹.

Ključne riječi: sunčana energija, navodnjavanje.

Abstract — The paper deals with atmospheric conditions in the agricultural area of Croatia bringing occasional dry periods when irrigation is indispensable. Solar energy can be utilized in such cases. The energy potential of incoming solar radiation and the meteorological conditions necessary for the utilization of the energy are presented. M. Fančović's model simulating operation from pump to water flow is described. In summer, collectors containing photovoltaic solar cells can be placed horizontally while in spring and autumn they should face south and be inclined by about 40°. According to the climatic conditions in Osijek, the largest water flow from the centrifugal solar pumps is 16.8 m³ h⁻¹ in summer but only 6.5 m³ h⁻¹ in winter.

Key words: solar energy, irrigation

1. UVOD

Poljoprivredno područje Hrvatske ima u prosjeku povoljne oborinske uvjete i uglavnom dovoljnu količinu vode tijekom vegetacijskog razdoblja (Hidrometeorološki zavod, 1977; Penzar,

B., 1977; Penzar i Penzar, 1979-80.; Škreb i sur., 1942), kako se to vidi i iz godišnjeg hoda srednje količine oborine (sl. 1). Zbog toga u nas nije običaj graditi postrojenja za navodnjavanje većih poljodjelskih površina. Međutim, svjedoci smo toga da kraća ili dulja sušna razdoblja zahvaćaju povre-

¹Dopunjeno konferencijsko priopćenje sa skupa Poljoprivreda i gospodarenje vodama, Bizovačke toplice, 17.-19. studenoga 1994., s privolom organizatora

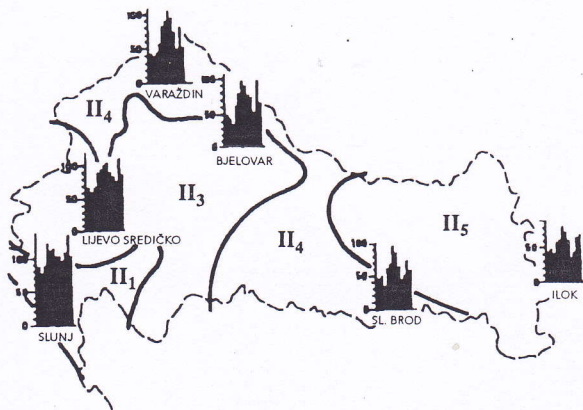
meno i naše područje, a ne samo neke druge dijelove svijeta, o čemu govore i redoviti izvještaji Svjetske meteorološke organizacije od 1948. nadalje (World Meteorological Organization 1894-1994) te domaće publikacije Hidrometeorološkog zavoda o izvanrednim meteorološkim i hidrološkim prilikama u Hrvatskoj u posljednjih 17 godina (Državni hidrometeorološki zavod, 1976-1994). Iz njih proizlazi da beskišna razdoblja dulja od 20 dana (kad je dnevna količina oborine manja od 0,1 mm) nastupaju ponekad i dva puta na godinu.

U suhim razdobljima bilo bi potrebno navodnjavati pojedine ratarske kulture. Kako u takvim prilikama nema dosta vode u riječnim i potočnim tokovima, trebalo bi podzemnu vodu iz dubokih bunara i bušotina crpkama prelijevati u sustav cijevi i kanalića ili u vodonosne tornjeve iz kojih bi se voda dalje razlijevala po njivama.

Za pogon crpke vrlo se uspješno primjenjuje električna struja proizvedena u fotonaponskim silicijevim sunčanim ćelijama. Ćelije su ugrađene u panoe koji djeluju kao sakupljači sunčane energije. Da bi navodnjavanje određenog polja bilo uspješno, potrebno je znati dozračenu sunčanu energiju, veličinu panoa, svojstva crpke, vlažnost tla i stanje usjeva. Razrađena metoda i program prilagođen osobnom računalu omogućuju jednostavno praćenje i usklađivanje rada cjelokupnog postrojenja za navodnjavanje.

2. VREMENSKA STANJA U DOBA SUŠNIH RAZDOBLJA

Meteorolozima su dobro poznata atmosferska stanja i strujno polje u doba duljeg beskišnog vre-



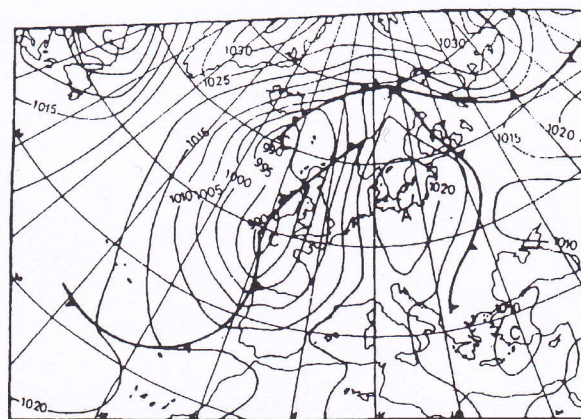
Slika 1. Srednji godišnji hod količine oborine na odabranim postajama u poljoprivrednom području Hrvatske

Figure 1. The annual course of rainfall at some selected meteorological stations in the agricultural area of Croatia.

mena. Tada se u najdonjem dijelu atmosfere zadržava anticiklona ili greben visokog tlaka, a u visini greben planetarnog vala (Pandžić, 1993.; Pandžić, Kisegi, 1990; Pandžić i sur., 1992; Penzar 1977). Umjesto uobičajenog strujanja koje pretežit dolazi sa zapadne strane obzorja, vlada sjeverna ili južna zračna struja. Kao primjer prikazuju slike 2 i 3 sinoptičko stanje 17. svibnja 1993. (Deutscher Wetterdienst, 1993), kad je Hrvatska u cijeloj drugoj dekadi svibnja bila pod utjecajem polja povišenog atmosferskog tlaka. U takvim okolnostima ni ciklone ni fronte s Atlantika ne mogu prolaziti našim krajevima, pa stoga nema ni kiše.

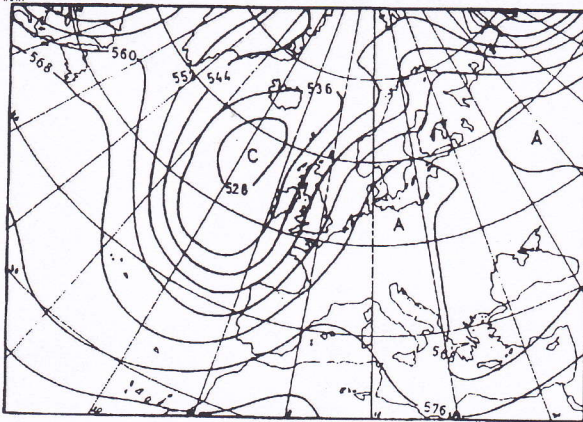
Mehanizam nastanka i održavanja atmosferskih stanja koja ciklonama priječe put prema istoku, objašnjavaju razne teorije, od kojih su najvažnije tri: a) teorija nelinearnog međusobnog djelovanja dugih stojnih valova na prividno nepomičan Rossbyjev val, b) teorija o zaustavljanju slobodnog putujućeg planetarnog vala u blizini nepomičnog vala i c) teorija o miješanju energije između više planetarnih valova normalnih faza, ali povećanih amplituda (Pletikapić, 1987). Radi se o valovima u srednjoj i gornjoj troposferi.

Kad se jednom stvori zaprečna anticiklona ili greben, onda takvo stanje obično potraje desetak i više dana. Ako nastupi u vegetacijskom razdoblju, može izazvati ozbiljne štete na usjevima i osiromašenje ljetine, osobito kad tlo nije bilo od prije natopljeno vlagom. To se, nažalost, događa u posljednje vrijeme i po više puta godišnje, a prema nekim klimatološkim predviđanjima mogle bi ljetne suhoće postati redovitije u idućih stotinjak godina (German Bundestag, 1980; World Meteorological Or-



Slika 2. Prizemno atmosfersko stanje nad Europom 17. svibnja 1993. u 13 sati

Figure 2. The synoptic situation in Europe on 17 May 1993 at 12.00 UTC.



Slika 3. Karta apsolutne topografije izobarne plohe 500 hPa nad Europom 17. svibnja 1993. u 13 sati

Figure 3. The constant pressure chart of 500 hPa over Europe on 17 May 1993 at 12:00 UTC.

ganization, 1994). Da ne bi nedostatak vode ugrozio fotosintezu, transpiraciju, kolanje hranjivih tvari kroz tlo i biljke, a time i poljoprivrednu proizvodnju, potrebno je razmišljati o izgradnji sustava za navodnjavanje.

3. OPIS MODELA ZA NAVODNJAVANJE NA SUNČANI POGON

Model za navodnjavanje na sunčani pogon za naše prilike razradili su M. Fančović, 1990. i M. Fančović, Z. Glasnović, 1990. Kako je mr. Miroslav Fančović iznenada preminuo (1992), a njihovo istraživanje nije dovoljno poznato, želimo taj model predstaviti širem krugu stručnjaka. Prema Fančović, 1990. složeni meteorološko-energijsko-hidropedološki model daje uvid u raspoloživu energiju za pogon, ustanovljava potrebnu količinu vode za navodnjavanje i s tim u vezi određuje rad crpke, protok vode i najveću površinu koju u danim okolnostima postrojenje može navodniti.

Polazi se od poznatih podataka o dozračenju sunčanoj energiji, a ako oni nedostaju, poseban ih program izračunava iz meteoroloških motrenja osunčavanja ili naoblake. Za tu svrhu upotrebljavaju se često stohastički modeli tipa A. Angstroemove relacije:

$$G = G_0 (a + bR + cR^2) \quad (1)$$

pri čemu je G_0 ekstraterestričko, a G prosječno dnevno ukupno sunčevo zračenje, procijenjeno iz relativnog osunčavanja, odnosno iz naoblake. Veličine a , b i c dobiju se iz višegodišnjih mjerenja.

One imaju drugačije brojčane iznose ako R predstavlja srednje osunčavanje, nego ako R znači srednju naoblaku. U tom drugom slučaju za područje Osijek je vrijedi

$$a=0.407; b=0.704; c=-1.015,$$

ako je naoblaka dana u decimalnom obliku. Ekstraterestričke vrijednosti za G_0 mogu se naći za naše zemljopisne širine u radu Penzar, 1996. U njemu se nalaze i upute kako preračunati dozračenu sunčanu energiju G s vodoravne na kosu površinu.

Neki podaci o dozračenju sunčanoj energiji u Hrvatskoj mogu se naći u brojnim radovima (Fančović, Glasnović, 1990; Penzar, B., I. Penzar, 1960; Žibrat, Gajić-Čapka, 1986; i dr.). Iz njih proizlazi da na vodoravnu površinu u sjevernim dijelovima Hrvatske dolazi ljeti na dan do 2100 Jcm^{-2} sunčane energije, a zimi oko 320 Jcm^{-2} . Na kose plohe okrenute prema jugu dolazi i znatno više, pogotovo u doba kad Sunce nije visoko nad obzorjem. Određeni program modela sam računa dolaznu energiju na plohu panoa uvažavajući njezin nagib i činjenicu da je za pogon crpke učinkovita samo energija veća od $100 \text{ Whm}^{-2}\text{h}^{-1}$.

Proizvedenu struju I i napon U u panelu računa se na temelju broja serijski N_S i paralelno N_P spojenih ćelija ugrađenih u pano uz uvažavanje temperature zraka T i dozračenju sunčane energije G po relacijama

$$U = U_0 - \alpha_U (T - T_0) \quad (2)$$

i

$$I = [I_0 + \alpha_I (T - T_0)] G \cdot G_0^{-1} \quad (3)$$

Pritom su I_0 , T_0 i U_0 referentne veličine, a α_U i α_I jesu temperaturni koeficijenti napona i struje. Fotogenerirana struja I_0 i napon U_0 između ostaloga ovise o broju paralelno i serijski spojenih ćelija u panelu.

Tako dobivena struja uračunava se u rad istosmjernog elektromotora. Kutna brzina okretanja osi motora razmjerna je električnom naponu u panelu. Iz toga se određuje protok vode kroz crpku. Za volumno vijčanu crpku protok je razmjernan izlaznoj snazi motora, a obrnuto razmjernan visini na koju se voda podiže. Protok kroz centrifugalnu crpku razmjernan je kutnoj brzini crpke, a smanjuje se također s visinom dizanja vode i s otporom cjevovoda. Za dizanje vode do $H = 40 \text{ m}$ primjenjuju se centrifugalne, a za veće visine vijčane crpke. Protok vode Q u prvom slučaju daje jednadžba

$$Q = P (\rho g H)^{-1} \quad (4)$$

a u drugom protok vode Q' jest

$$Q' = P' \eta_1 \eta_2 (\rho g H)^{-1} \quad (5)$$

Veličina P jest izlazna snaga centrifugalne crpke, a P' je snaga motora vijčane crpke, ρ je gustoća vode, g ubrzanje sile teže, a η_1 i η_2 efikasnosti rada motora i crpke.

Da bi se navodnjavanje odvijalo u skladu s vodnim potrebama usjeva, programom se proračunavaju sve sastavnice vodnog obračuna. Tu kao ulazni podaci služe oni o dozračenoj sunčanoj energiji, količini oborine, temperaturi zraka, vodnim zaliham u tlu i vodnom kapacitetu tla. Iz njih se dobiva količina vode koja bi se mogla ispariti u najpovoljnijim uvjetima, količina podzemne vode koja napaja korijenje, uvažavajući i vlagu zaostalu u tlu iz prethodnog mjeseca ili od prethodne kiše te napokon količina vode potrebna za navodnjavanje. Sastavnice u jednadžbi vodnog obračuna, kao što su zalihe vode u tlu w_Z iz prethodnog mjeseca i dizanje dubinske vode w_D , dobivaju se po Palmerovoj ili kojoj drugoj metodi, s tim da se potencijalno isparena količina vode w_E određuje Turcovim postupkom iz dozračene energije G i temperature zraka T . Potrebna količina w vode za navodnjavanje

dobije se iz oborinske vode w_O i navedenih sastavnica po relaciji

$$w = w_E - w_O - w_Z - w_D \quad (6)$$

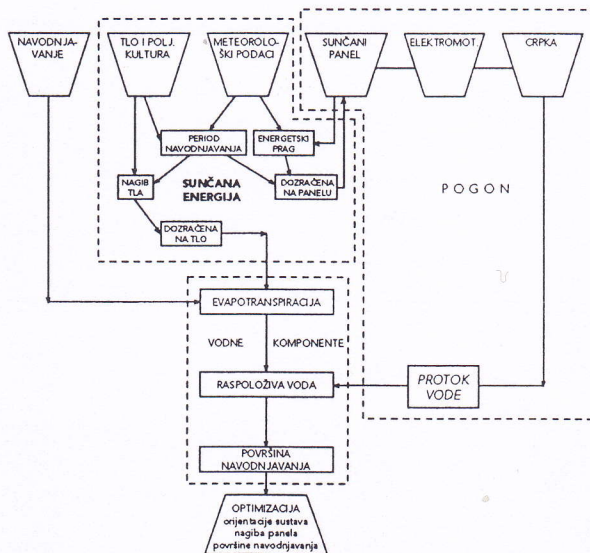
Iz te potrebne količine w i prije određenog protoka vode Q , odnosno Q' , kroz crpku program određuje koliku bi površinu S postrojenje moglo navodniti u postojećim meteorološkim okolnostima:

$$S = Q \cdot w^{-1}, \text{ odnosno } S = Q' \cdot w^{-1} \quad (7)$$

4. NEKI REZULTATI PRORAČUNA

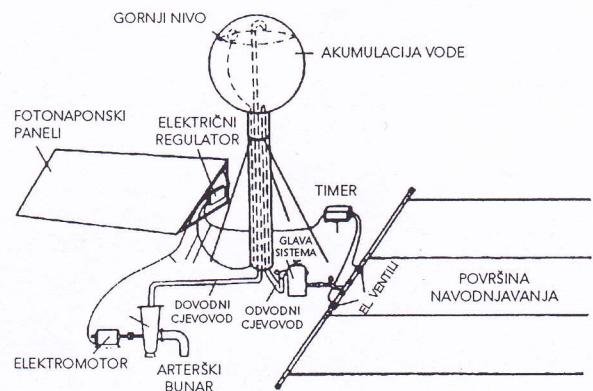
Od brojnih Fančovićevih rezultata (Fančović, 1990) za područje Osijeka odabrali smo za prikaz one o dozračenoj sunčanoj energiji (tab. 1), protocima vode (tab. 2) i o količini vode potrebnoj za navodnjavanje (tab. 3). Protok vode kroz crpku odnosi se na sunčani panel sastavljen od 276 serijski spojenih i 23 paralelno spojene ćelije. Za maksimalnu izlaznu snagu ćelije uzelo se 3,5 kW, učinkovitost 3%, proizvedenu struju 1,4 A, struju zasićenja 30 μ A, otpor 0,05 Ω , učinkovitost motora 81%, otpor armature 0,17 Ω , kutnu brzinu vijčane crpke 240 s^{-1} , a centrifugalne 361 s^{-1} . Vodni proračun izveden je uz pretpostavku vodnog kapaciteta oraničnog sloja tla 107 mm, kritične vlažnosti tla za uvenuće bilja 9,6 mm, lisne površine usjeva 0,6 i duljine korijenja 1,5 m i da se voda u tlu nalazi na dubini između 0,5 i 4 m, ovisno o dijelu godine.

Model prikazuje da bi u prosječnim meteorološkim okolnostima trebalo tlo navodniti samo u



Slika 4. Blokdiagram Fančovićevog modela za proračun vode potrebne za navodnjavanje (Fančović, 1990)

Figure 4. The model of water flow necessary for irrigation - block diagram (Fančović, 1990).



Slika 5. Shema heliotehničkog postrojenja u uređaju za navodnjavanje (Fančović, 1990)

Figure 5. Scheme of photovoltaic water pumping system (Fančović, 1990).

Tablica 1. Prosječna dnevna dozačena sunčana energija i osunčavanje vodoravne i južne plohe nagiba 20° i 40° u području Osijeka

Table 1. Mean daily incoming solar radiation and insolation on the horizontally placed surface inclined by 20° and 40° in the Osijek area

Mjesec	Dozačena energija (kWh m ⁻²)			Osunčavanje (sati)		
	Nagib panoa (°)			Nagib panoa (°)		
	0	20	40	0	20	40
Siječanj	1,10	1,43	1,65	9,2	9,2	9,2
Veljača	1,85	2,30	2,56	10,4	10,4	10,4
Ožujak	3,07	3,52	3,69	11,9	11,9	11,8
Travanj	4,29	4,53	4,46	13,5	12,8	12,3
Svibanj	5,17	5,21	4,92	14,9	13,5	12,5
Lipanj	5,76	5,67	5,27	15,7	13,8	12,5
Srpanj	5,95	5,90	5,51	15,4	13,7	12,5
Kolovoz	5,37	5,53	5,31	14,4	13,2	12,4
Rujan	4,14	4,54	4,57	12,9	12,5	12,3
Listopad	2,84	3,37	3,63	11,5	11,5	11,5
Studeni	1,55	1,90	2,12	10,1	10,1	10,1
Prosinac	0,97	1,23	1,40	9,0	9,0	9,0

kolovozu i rujnu, a ako su zalihe vode u tlu preostale iz prethodnog mjeseca minimalne, onda u mjesecima od lipnja do rujna. Uz prosječne zalihe vode u tlu, trebalo bi navodnjavati u beskišnim razdobljima od ožujka do studenog. Iz proračuna također proizlazi da bi u normalnim prilikama najviše vode trebalo dodati tlu u kolovozu, a u slučaju beskišnog vremena ili kad je tlo od prije suho, u srpnju. Vijčana crpka pokretana jednim sunčanim panelom u normalnim vremenskim okolnostima zadovoljavala bi potrebe za vodom na površini 6,8 ha, a u beskišnom razdoblju na površini 2,5 ha. Centrifugalna crpka mogla bi u normalnim okolnostima natopiti 28 ha, a u suhim samo 10 ha, no pri tom se ne smije zaboraviti da takva crpka može podići vodu samo na visinu 5 m.

Iz tablice 1 vidljivo je da vodoravno postavljeni panovi dobivaju više sunčane energije ljeti, a koso postavljeni zimi, između listopada i travnja.

Tablica 2. Prosječni satni protoci vode u postrojenju za navodnjavanje

Table 2. Mean hourly data in the irrigation plant

Mjesec	a) Vijčana crpka (m ³ h ⁻¹)			b) Centrifugalna crpka (m ³ h ⁻¹)		
	Nagib panela (°)			Nagib panela (°)		
	0	20	40	0	20	40
Siječanj	0,71	0,92	1,05	7,37	7,71	8,20
Veljača	0,98	1,21	1,34	8,50	8,72	9,70
Ožujak	1,70	1,97	2,07	9,74	10,93	11,32
Travanj	2,59	2,77	2,73	13,01	13,59	14,43
Svibanj	3,28	3,30	3,10	14,88	14,93	14,42
Lipanj	3,77	3,71	3,42	16,04	15,89	15,19
Srpanj	4,13	4,11	3,83	16,82	16,76	16,13
Kolovoz	3,99	4,15	4,00	16,52	16,55	16,55
Rujan	3,14	3,54	3,63	14,51	15,56	15,74
Listopad	2,02	2,52	2,80	10,96	12,78	13,66
Studeni	1,30	1,70	1,97	7,42	9,70	10,93
Prosinac	0,76	0,98	1,12	6,70	6,76	6,90

Tablica 3. Voda potrebna za navodnjavanje u slučaju a) prosječne količine oborine i prosječne zalihe vode u tlu b) prosječne količine oborine i minimalne zalihe vode u tlu, c) beskišnog razdoblja s prosječnom zalihom vode u tlu

Table 3. The needed irrigation water in the case of: a) mean precipitation and mean ground water supply, b) mean precipitation and minimum ground water supply, c) period without precipitation and mean ground water supply

Mjesec	Potrebna voda (m ³ ha ⁻¹)											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
a	0	0	0	0	0	0	0	215	209	0	0	0
b	0	0	0	0	0	12	320	285	249	0	0	0
c	0	0	2	100	382	649	705	677	536	331	138	0

5. LITERATURA

- Deutscher Wetterdienst, 1993: *Europaeischer Wetterbericht*. Vol 18, No 137, Offenbach a. M.
- Državni hidrometeorološki zavod, 1976-1994: *Izvanredne meteorološke i hidrološke prilike u Hrvatskoj*. Vol. 1-17, Zagreb.
- Fančović, M., 1990: Razrada analitičkog modela za optimalni rad heliotehničkog postrojenja za navodnjavanje, *Magistarska radnja* na postdiplomskom studiju prirodnih znanosti iz područja fizike- fizike atmosfere, Sveučilište u Zagrebu, 95 str. i prilozi.
- Fančović, M. i Z. Glasnović, 1991: Proračun dozračene energije globalnog Sunčevog zračenja na nagnute prihvadne plohe u Hrvatskoj, *Sunčeva energija* 12, 39-48.
- German Bundestag, 1980: Protecting the Earth's Atmosphere, An International Challenge, *Interim report of the Study Commission of the 11th German Bundestag*, Publ. Sect. Bonn, 592 pp.
- Glasnović, Z. and M. Fančović, 1991: Analytic model of a photovoltaic water pumping system, *Idojaras* 93, 330-338.
- Hidrometeorološki zavod SR Hrvatske, 1977: *Atlas klime SR Hrvatske*. Zagreb.
- Pandžić, K., 1993: Klimatološko-meteorološki aspekt suše, *Zbornik radova okruglog stola o suši*, Zagreb, 21-27.
- Pandžić, K., i M. Kisegi, 1990: Principal component analysis of a local precipitation field within the global circulation, *Beitr. Phys. Atmosph.* 63, 101-116.
- Pandžić, K., M. Kisegi, M. Sijerković, B. Gelo, 1992: An analysis of the low and high pressure centre influence on precipitation, *Beitr. Phys. Atmosph.* 65, 107-128.
- Pletikapić, V., 1987: Blokirajuće situacije u atmosferi, *Diplomski rad* na Prirodoslovno-matematičkom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu. 87 str.
- Penzar, B., 1977: Atmosferska strujanja velikih razmjera i njihov utjecaj na vrijeme, *Priroda* 66/4-5, 92-97.
- Penzar, B. i I. Penzar, 1960: Raspodjela globalne radijacije nad Jugoslavijom i Jadranskim morem, *Hydrografski godišnjak* za 1959., 151--171.
- Penzar, B. i I. Penzar, 1979-80: O položaju i uzrocima ekstrema u godišnjem hodu oborine u Hrvatskoj, Dio I, *Geografski glasnik* 41-42, 27-48.
- Penzar, I., 1996: Sunčana energija, Poglavlje u knjizi B. Penzar i sur., *Meteorologija za korisnike*, Školska knjiga i Hrv. meteorološko društvo, Zagreb, 274 str.
- Škreb, S. i suradnici, 1942: *Klima Hrvatske*, Geofizički zavod (posebni otisak iz Zemljopisa Hrvatske, Matica Hrvatska), Zagreb, 138 str.
- World Meteorological Organization, 1894-1994: World Climate Programme - Data and Monitoring, Climate System Monitoring, *Monthly Bulletin*, Geneva.
- World Meteorological Organization, 1994: Climate Variability, Agriculture and Forestry, *Technical Note* 196, Geneva, 152 pp.
- Žibrat, Z. i M. Gajić-Čapka, 1986: Globalno zračenje na području SR Hrvatske, *Rasprave Hidrometeorološkog zavoda* 21, 47-58.