

N. Kinić
Z. Zarić
Institut "Boris Kidrič", Vinča
F.L. Test
University of Rhode Island, SAD

PREDVIDJANJE PONAŠANJA OBLAKA IZ RASHLADNIH
TORNJEVA

1. Uvod

Na današnjem stepenu razvoja 60 do 70% od ukupno razvijene toplote sagorevanjem fosilnog goriva ili nuklearnom fisijom potrebno je odvesti u atmosferu. Najveći deo ove otpadne toplote kod klasičnih termoelektrana odvođi se preko vode za hladjenje kondenzatora. Vrlo često, usled udaljenosti voda od elektrane ni je moguće primeniti protočno hladjenje. Osim toga vode - reke ili jezera - imaju ograničen termalni kapacitet koji u skoroj budućnosti može biti iscrpljen tako da se i u ovom slučaju moraju tražiti alternativna rešenja. Najčešće se u ovim slučajevima primenjuje hladjenje putem vlažnih tornjeva za hladjenje koji mogu biti sa prirodnom ili sa prinudnom cirkulacijom vazduha.

Kod vlažnog tornja za hladjenje rasprašena voda iz kondenzatora hladi se vazduhom uglavnom na taj način što se jedan deo vode isparava i odnosi sa sobom latentnu toplotu isparavanja. Na taj način vazduh na izlazu iz tornja najčešće je zasićen vodenom parom a osim toga nosi sa sobom i deo vode u vidu kapljica. Za jedinične kapacitete elektrana reda 1000 MW količina toplotne energije u oblaku iz rashladnog tornja još uvek je za red veličina manja od energije sadržane u jednom olujnom oblaku, tako da se bar za sada ne smatra da rashladni tornjevi mogu bitno uticati na promenu klime /1/.

Međutim, usled toga što se u oblaku iz tornja nalazi

kondenzovana voda ovaj se oblak može videti. Smatra se da je to slučaj ako je koncentracija vode viša od 10^{-4} kg/kg suvog vazduha. U određenim meteorološkim uslovima ova magla iz tornja može ograničiti vidljivost na okolnim drumovima ili aerodromima, a u zimsko vreme može dovesti i do poledice. Rosa koja se izdvaja iz oblaka može se u određenim uslovima hvatati na površinama u okolini tornja. Ako se radi o električnim instalacijama ovo može imati neželjene posledice.

Vidi se dakle da i rashladni tornjevi, pod određenim uslovima, predstavljaju potencijalne zagadjivače okoline. Uslovi koji dovode do ovog zagadjenja moraju se predvideti za određenu lokaciju kako bi se mogla dobiti dozvola za izgradnju. Analitičkim metodama predviđanja izračunava se trajektorija oblaka iz tornja i termodinamičko stanje oblaka duž trajektorije za određene atmosferske uslove za datu lokaciju. Pri ovome se obično prvo izračunava trajektorija do maksimalne visine do koje se oblak izdiže, a dalje se uzima da se oblak kreće brzinom i pravcem vetra i sa tim računa dalja difuzija oblaka. U radu se obuhvata samo prvi deo problema, koji zahteva složeniji matematički tretman.

2. Metod predikcije

Analitički model polazi od osnovnih jednačina koje definišu uzdizanje dima i oblaka date Briggsom /2/. Osnovna razlika između dima iz dimnjaka i oblaka iz rashladnog tornja leži u znatno većoj količini energije sadržane u oblaku najvećim delom u vidu vodene pare. Usled toga se oblak iz rashladnog tornja ponaša slično kao i kumulusni oblaci u atmosferi. Stoga su i jednačine koje daje Briggs modifikovane na osnovu radova iz mikrofizike kumulusnih oblaka /3, 4/; sličan postupak koristi i Hanna /1, 5/.

Sledeći sistem diferencijalnih jednačina daje gradijente u vertikalnom smeru fluksa količine kretanja:

$$\frac{d(wV)}{dz} = \frac{V}{w} [b + 0.61 g (q_p - q_e) - g\sigma] \quad (1)$$

fluksa energije:

$$\frac{d(bV)}{dz} = -sV - \frac{gL}{C_p T_p} \frac{dq_{ps}}{dz} - \frac{gL}{C_p T_p} (q_{ps} - q_e) \frac{dV}{dz} \quad (2)$$

i fluksa tečne vode:

$$\frac{d(\sigma v)}{dz} = -v \frac{dq_{ps}}{dz} - Q_r - (q_{ps} - q_e) \frac{dv}{dz} \quad (3)$$

U ovim jednačinama:

$$v = WR^2 \quad (4)$$

za mirno vreme, a za vetrovito:

$$v = UR^2 \quad (5)$$

$$b = \frac{g}{T_p} (T_p - T_e) \quad (6)$$

$$s = \frac{g}{T_p} \left| \frac{dT_e}{dz} + 0,01 \right| \quad (7)$$

a Q_r predstavlja količinu padavina iz oblaka:

$$Q_r = C_1 \frac{q_r^{1,125}}{WR} \quad (8)$$

sa: $C_1 = 0,107$. Količina tečne vode u oblaku sastoji se od sitnih kapi koje bivaju nošene i krupnih kapi, q_r , koje dovode do kišenja. U prvom približenju uzima se da procesi kondenzacije i isparavanja u oblaku obuhvataju samo sitne kapi, a da složeni procesi stvaranja krupnih kapi i njihovog narastanja ne utiču bitno na trajektoriju oblaka. U kasnijim analizama u kojima će se voditi bliže računa o precipitaciji iz oblaka moraju se uzeti u obzir i ovi procesi.

Da bi se rešio gornji sistem jednačina mora se imati relacija za gradijent vlažnosti pri zasićenju:

$$\frac{dq_{ps}}{dz} = \frac{Lq_{ps}}{R_v T_p^2} \frac{dT_p}{dz} \quad (9)$$

koji se dobija na osnovu Clausius-Clapeyronove jednačine i jednačine stanja idealnog gasa, i relacija za količinu usisanog vazduha koje zavise od toga da li je vreme mirno:

$$\frac{dR}{dz} = \mu_1 - \frac{Rb}{2W^2} \quad (10)$$

ili vetrovito:

$$\frac{dR}{dz} = \mu_2 \quad (11)$$

sa: $\mu_1 = 0,2$ i $\mu_2 = 0,5$.

Pri rešavanju gornjih jednačina uzima se da su svojstva oblaka ravnomerna u ravnima normalnim na osu oblaka. Ova pretpostavka se potvrđuje merenjima što se tiče trajektorije i vidljivosti oblaka ali ne zadovoljava za određivanje koncentracije vlage u zavisnosti od udaljenja od ose. Horizontalno pomeranje oblaka uzima se kao jednako proizvodu brzine vetra, u , i vremenskog intervala.

Potrebno je poznavanje sledećih početnih uslova: visina i izlazni prečnik tornja, izlazna brzina, temperatura i vlažnost vazduha iz tornja kao i odnos tečne vode u vidu sitnih kapi i u vidu krupnijih, kišnih kapi. Rešenja se dobijaju u zavisnosti od brzine vetra, temperature i vlažnosti okolnog vazduha u zavisnosti od visine.

Jednačine su nakon sredjivanja napisane u obliku konačnih razlika i rešavane su na digitalnom računaru CDC-3600 uz korišćenje Runge-Kutta aproksimacije četvrtog stepena duž trajektorije. Analitički postupak se sprovodi sve dok vertikalna brzina nije ravna nuli, što odgovara maksimalnom izdizanju oblaka.

3. Diskusija rezultata

Izložen analitički postupak primenjen je na izračunavanje trajektorija i vidljivosti oblaka iz jednog rashladnog tornja sa prirodnom cirkulacijom visine 100 m i izlaznog prečnika 60 m a za razne atmosfere uslove definisane u tabeli 1. Pri ovome je uzeto da je izlazna temperatura oblaka 305°K , količina tečne vode na izlazu $0,002 \text{ kg/kg}$, od čega polovina u vidu krupnih kapi ($q_r = 0,001 \text{ kg/kg}$), a temperatura uz površinu 275°K .

Tabela 1.

Slučaj	$s \times 10^4$	ϕ %	U m/s	Z_{max} m	X_{max} m	Z_{vid} m	Z_{maxB} m
1	0	80	0	∞	0	>5000	-
2	3,31	80	0	1120	0	1120	1075
3	3,31	60	0	980	0	980	960
4	3,31	80	2	620	330	620	685
5	3,31	80	10	390	1720	290	430

U poslednjoj koloni upoređene su vrednosti maksimalne visine uzdizanja dobijene proračunom sa vrednostima dobijenim na

osnovu empirijskih formula koje daje Briggs, $Z_{\max B} / 2$. Vidi se da je slaganje zadovoljavajuće.

Iz tabele 1 vidi se da pri neutralnim atmosferskim uslovima ($s = 0$) bez vetra oblak ne prestaje da se izdiže i da je vidljiv, odnosno da sadrži određenu količinu sitnih kapi i na visinama od oko 5 km. Maksimalna visina uzdizanja značajno zavisi od relativne vlažnosti atmosfere i brzine vetra. Za brzinu vetra od 10 m/s dobija se da oblak prestaje da bude saturisan pre nego što dostigne maksimalnu visinu. Ponašanje oblaka za slučajeve 2 i 4 predstavljeno je na sl.1 odnosno na sl.2.

Analitički postupak je takođe upoređen sa rezultatima merenja izvršenim na rashladnim tornjevima TE Keystone, SAD, izloženim u /6/. Dimenzije ovih tornjeva su približno iste kao i dimenzije korišćene u proračunu. Temperatura zasićenog vazduha iz tornjeva iznosila je 288 K pri čemu se smatra da nije bilo krupnih kapi vode. Faktor stabilnosti, s , iznosio je $0,61 \cdot 10^{-4}$, a relativna vlažnost 40%, pri čemu se ove vrednosti nisu menjale sa visinom. Nije se raspolagalo sa detaljnim podacima o vetru. Na dve stanice udaljene svaka oko 50 km od elektrane brzina pri zemlji iznosila je 3,5 odnosno 4 m/s, a na jednoj od njih izmerena je brzina od 6,5 m/s na visini od 600 m. Merenja su vršena iz helikoptera u nezasićenom području oblaka, pošto je u zasićenom turbulencija bila suviše visoka. Merene su temperatura i vlažnost u zavisnosti od mesta u oblaku. Vidljivi deo oblaka imao je visinu od oko 200 m na horizontalnom rastojanju od 100 do 200 m od tornja. Merenja su pokazala da je na horizontalnom rastojanju od 640 m visina oblaka iznosila oko 400 m, oblak bio praktično horizontalan sa temperaturom od 1°C i relativnom vlažnošću od 45%.

Odgovarajući rezultati dobijeni izloženim računskim postupkom dati su u tabeli 2 za razne moguće brzine vetra i sadržaje tečne vode na izlazu iz tornja (σ_0).

Iz tabele 2 može se videti da ponašanje oblaka na 640m zavisi u velikoj meri od brzine vetra i sadržaja tečne vode na izlazu iz tornja koji nisu specificirani u rezultatima datim u /6/. Međutim, iz tabele 2 se može videti da se za $u = 5 \text{ m/s}$ i $\sigma_0 = 0,0026 \text{ kg/kg}$ rezultati proračuna u priličnoj meri slažu sa merenjima. Ove vrednosti su u okviru mogućih vrednosti pri merenjima, pa se može smatrati da izložen postupak daje dobre rezultate.

Tabela 2

Slučaj	U m/s	σ_0 kg/kg	Na x = 640 m			oblak vidljiv	
			ϕ %	T_p $^{\circ}$ C	Z m	Z m	X m
6	1,0	0,0053	55	0,5	480	250	42
7	2,5	0,0053	58	1,1	360	189	73
8	4,0	0,0053	58	1,8	300	169	99
9	5,4	0,0053	60	2,2	259	159	120
10	2,5	0,0026	50	0,2	499	159	43
11	2,5	0,0013	50	-0,2	549	139	27
12	2,5	0	49	-0,5	589	0	0

Utica j brzine vetra na trajektoriju i vidljivost oblaka vidi se sa sl.3 (slučajevi 6, 7, 8 i 9), a uticaj sadržaja tečne vode, τ_0 , sa sl.4 (slučajevi 7, 10, 11 i 12). Vidi se da visina uzdizanja i vidljivosti oblaka opadaju sa porastom brzine vetra usled poboljšanih uslova mešanja. Obrnuto, visina uzdizanja raste sa smanjenjem sadržaja vode na izlazu.

4. Zaključci

Izloženi analitički postupak za određivanje karakteristika oblaka iz rashladnih tornjeva u zavisnosti od atmosferskih uslova, od napuštanja tornja do maksimalne visine uzdizanja u zadovoljavajućoj meri je u skladu sa ograničenim obimom rezultata merenja koji su na raspolaganju. Dalja usavršavanja postupka, za određivanje precipitacije iz tornja i uslova stvaranja magle su u toku.

Može se konstatovati da ograničen broj nedovoljno detaljnih eksperimentalnih rezultata upućuje na potrebu detaljnijih merenja karakteristika tornja u zavisnosti od meteoroloških uslova. U ovom pogledu naročito je značajno određivanje sadržaja i vrste kapi vode na izlazu iz tornja.

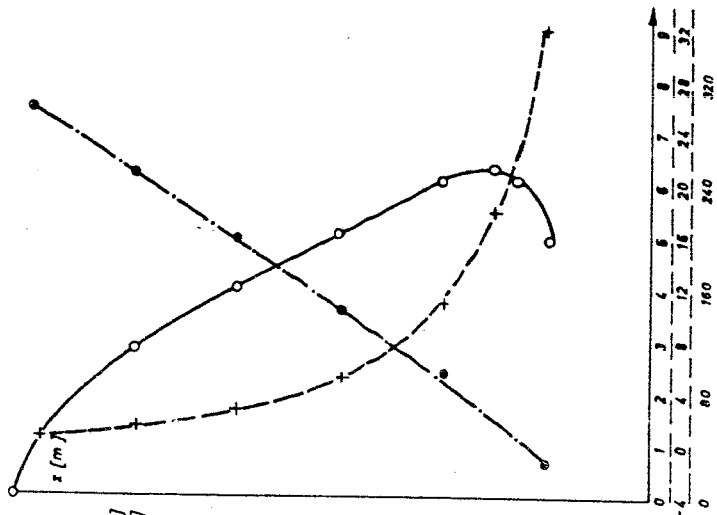
Nomenklatura

- b - $g(T_p - T_e)/T_p$
 C_p - specifična toplota vazduha
g - ubrzanje zemljine teže

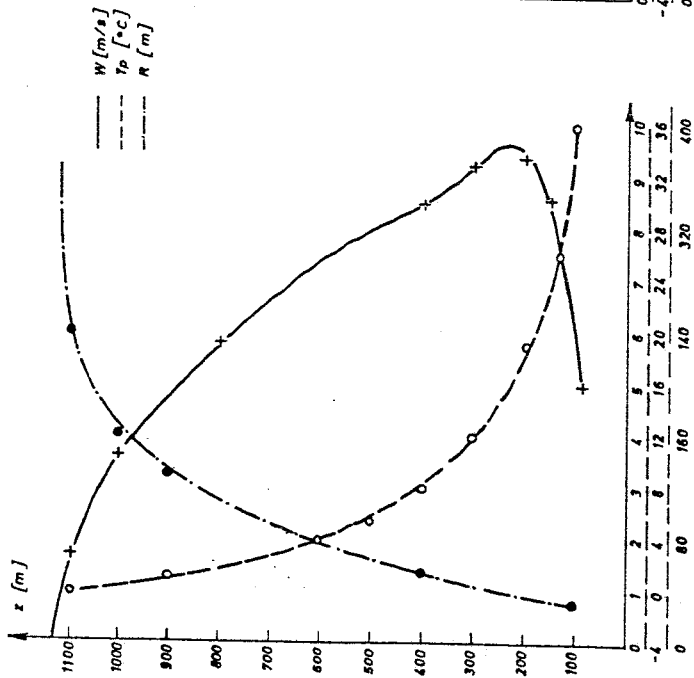
L	- latentna toplota isparavanja
q_e	- apsolutna vlažnost okoline
q_p	- apsolutna vlažnost oblaka
q_{ps}	- apsolutna vlažnost oblaka pri zasićenju
q_r	- sadržaj vode u vidu krupnih kapi
R	- poluprečnik oblaka
R_v	- gasna konstanta za vodenu paru
s	- parametar stabilnosti, $= g [(dT_e/dz) + 0,01]$
T_e	- temperatura okoline
T_p	- temperatura oblaka
U	- brzina vetra
V	- zapreminski protok
w	- brzina oblaka duž Z ose
X	- horizontalno rastojanje od tornja
X_{max}	- horizontalno rastojanje koje odgovara Z_{max}
Z	- vertikalno rastojanje
Z_{max}	- maksimalno vertikalno izdizanje oblaka
Z_{vid}	- visina do koje je oblak vidljiv
τ	- sadržaj tečne vode u oblaku
τ_o	- sadržaj tečne vode na izlazu iz tornja
ϕ	- relativna vlažnost.

Literatura

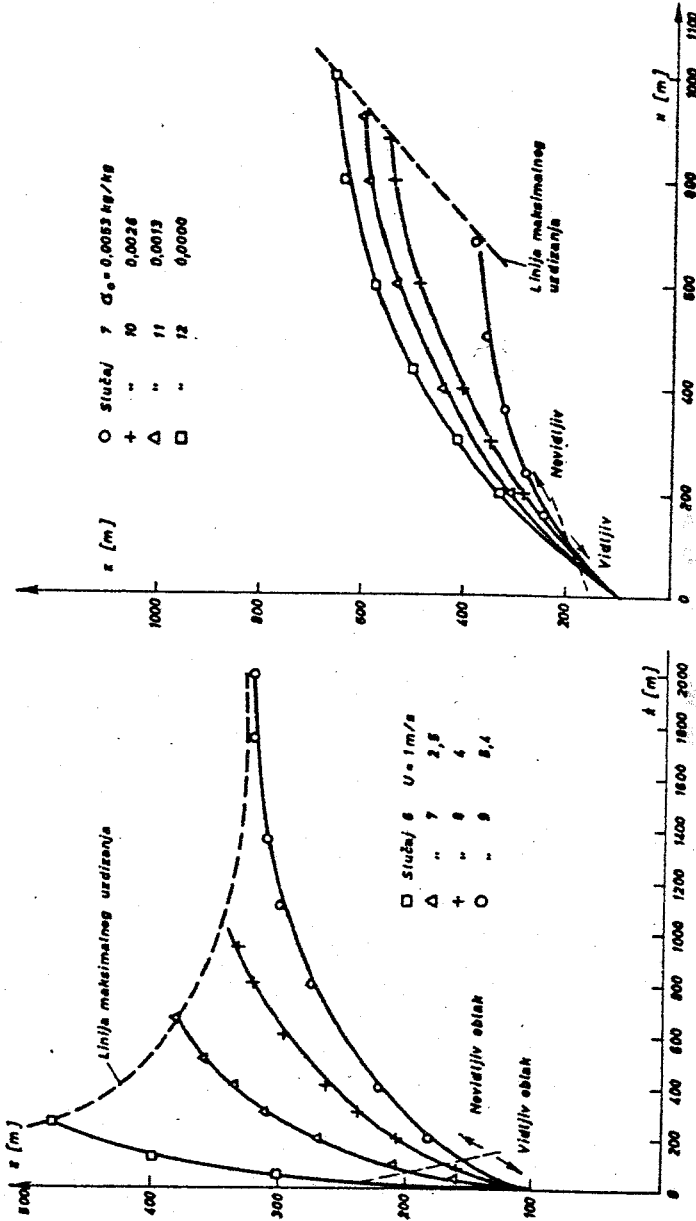
- /1/ Hanna, S.R.: Meteorological effects of cooling tower plumes, Winter Ann.Meeting, Cooling Tower Inst., Houston, 1971.
- /2/ Briggs, G.A.: Plume rize, AEC Critical Review Series, TID-25075, 1969.
- /3/ Simpson, J.; Wiggert, V.: Models of precipitating cumulus towers, Mon.Weather Rev., 97 (1969), 471/489.
- /4/ Weinstein, A.I.: A numerical model of cumulus dynamics and microphysics, J.Atmosph.Scie., 27 (1970), 246/255.
- /5/ Hanna, S.R.: Rise and condensation of large cooling tower plumes, J.Appl.Meteorology, 11 (1972) 793/799.
- /6/ Stockhom, J.: Cooling tower study, Rpt. Illinois Inst. of Techn.Res.Inst., Jan.1971.



SI. 2 KARAKTERISTINE OBLAKA, VETROVITO (slučaj 4)



SI. 1 KARAKTERISTINE OBLAKA, MIRNO VREME (slučaj 2)



Sl. 4. UTICAJ SAORŽAJA KAPLJICA NA IZLAZU IZ TORNJA NA TRAJEKTORIJU I VIDLJIVOST OBLAKA.

Sl. 3. UTICAJ BRZINE VETRA NA TRAJEKTORIJU I VIDLJIVOST OBLAKA.

