

Samoprečišćavanje prirodnih vodotoka

Asimilacija zagađenih materija obavlja se u vodotocima posredstvom biohemijskih procesa. Ključnu ulogu u tim procesima ima hidrodinamička struktura toka. Konvekcijom se zagađenje prenosi niz tok, a razblaženje zagađenja se obavlja posredstvom turbulentne difuzije i disperzije. Deo zagađenja dospeva do dna, gde se istaložava. Sve to važi za „konzervativne materije“, čija se zapremina ne menja u sistemu.

Rečni tok je živa ekološka sredina, koja sadrži brojne organizme koji međusobno utiču jedni na druge. Biohemijsko dejstvo ovih organizama obezbeđuje razgradnju „nekonzervativne materije“ organskog porekla. Na taj način se ostvaruje samoprečišćavanje reke kao ekološkog sistema. Ta sposobnost vodotoka je ključan faktor za kvalitet vode.

Za održavanje biohemijskih reakcija je neophodna energija. Osnovni izvor energije za žive organizme je *rastvoreni kiseonik*. Koncentracija rastvorenog kiseonika je osnovni parametar kvaliteta vode i indikator biohemijske aktivnosti. Ova koncentracija je u korelaciji sa produktima te aktivnosti, kao što su ugljendioksid, amonijak, nitriti, nitrati itd. Pored toga, za opstanak živih organizama (riba, krustaca i dr.) neophodna je određena (minimalna) koncentracija rastvorenog kiseonika. U nastavku se detaljnije razmatra pitanje kvaliteta rečne vode, pri čemu se biohemijsko zagađenje tretira isključivo na osnovu *bilansa* rastvorenog kiseonika u vodotoku.

1.1 Ekološki sistem

Ekološki sistem se sastoji od četiri komponente (Slika 1.1).

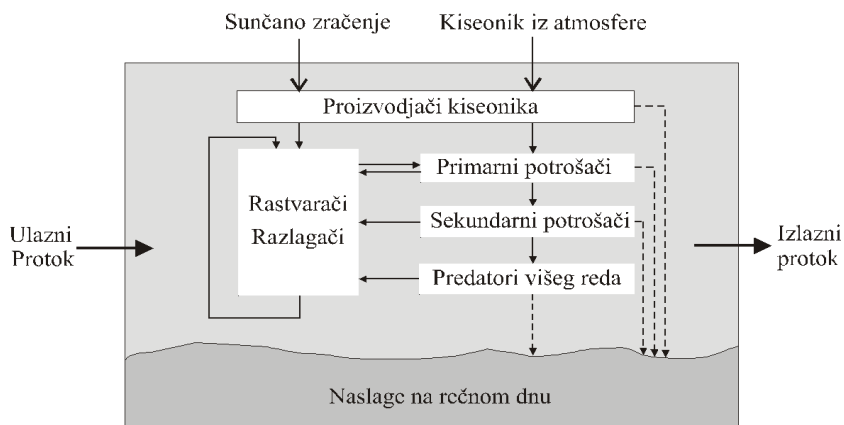
(i) *Supstrat* čine hemijske materije: kiseonik, ugljenik, amonijak itd., kao i organske materije – hranljive substance za ishranu mikroorganizama koji obavljaju biološko prečišćavanje.

(ii) *Proizvodjači kiseonika* su živi organizmi ekosistema koji koriste proste hemijske materije i sunčavu energiju za rast ćelija i proizvodnju kiseonika (alge, fitoplanktoni, plivajuće ili ukorenjene biljke).

(iii) *Potrošači kiseonika* svih redova su živi organizmi koji se hrane proizvođačima kiseonika (herbifori) ili drugih potrošača (karnifori) u lancu ishrane; taj lanac se može predstaviti shematski ovako:

protozoe i krustaci → larve insekata → insekti → ribe → predatori višeg reda (sisari, čovek).

(iv) *Razlagači kiseonika* su bakterije koje za svoj rast i reprodukciju koriste ostatke mrtvih proizvođača ili potrošača. Na kruju procesa se ostaci vraćaju u sistem u vidu prostih hemijskih materija.



Slika 1.1: *Rečni ekosistem*

Na svakom nivou lanca ishrane, pojavljuje se proizvodnja i potrošnja kiseonika. U tom smislu se može definisati niz „izvora” i „ponora” kiseonika.

Izvori kiseonika su:

- zapremina vode koja dotiče u ekosistem;
- fotosinteza;
- reoksigenacija preko površine vode.

Ponori kiseonika su:

- biološka oksidacija organskih ugljeničnih materija;
- biološka oksidacija organskih azotnih materija;
- razlaganje muljevitog materijala na rečnom dnu;
- respiracija vodenih biljaka;
- hemijski zahtev jedinjenja koja se ispuštaju u vodu u vidu sulfida.

Promena koncentracija rastvorenog kiseonika je posledica medjusobnih uticaja navedenih fenomena. Mikroorganizmi, nazvani „*aerobni mikroorganizmi*”, koriste ovaj rastvoreni kiseonik za biološku oksidaciju organskih materija. Međutim, u odsustvu rastvorenog kiseonika, oksidacija se može obavljati pomoću „*anaerobnih mikroorganizama*” koji pozajmljuju neophodan kiseonik materijama i solima koje su prisutne u vodi (organskim substancama, nitratim, sulfatima itd.). Anaerobne reakcije dovode do emisije neprijatnih mirisa povezanih sa proizvodnjom jedinjenja SH_2 i CH_4 .

1.2 Izvori kiseonika

1.2.1 Reoksisigenacija preko površine vode

Razmatra se zapremina vode \forall unutar koje je koncentracija rastvorenog kiseonika C ravnomerna (uniformna). Prag apsorpcije atmosferskog kiseonika se može proceniti pomoću sledećeg izraza:

$$\frac{dC}{dt} = \frac{K_1 \cdot \Omega}{\forall} (C_{zas} - C) \quad (1.1)$$

gde je t – vreme, C – srednja koncentracija rastvorenog kiseonika u zapremini \forall , Ω – površina vode na kojoj se ostvaruje kontakt vazduh – voda, C_{zas} – koncentracija zasićenja koja zavisi od temperature vode i atmosferskog pritiska, a K_1 – koeficijent apsorpcije koji zavisi od karakteristika rečnog toka.

Izraz (1.1) se često kraće piše u obliku:

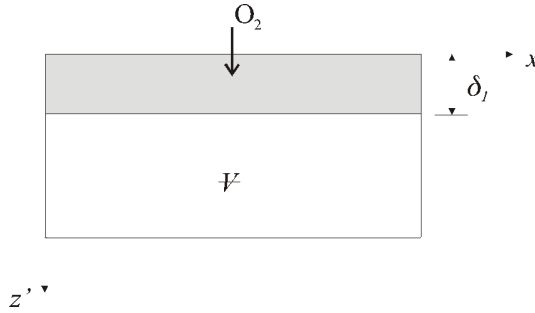
$$\frac{dC}{dt} = K_2 (C_{zas} - C) \quad (1.2)$$

gde je $K_2 = K_1 \cdot \Omega / \forall$ - „*koeficijent reoksisigenacije*” [2].

Površina Ω se teško može definisati kada su u pitanju turbulentni tokovi. Ako se sa Ω_o obeleži projekcija površine Ω na horizontalnu ravan, onda je veličina odnosa Ω / Ω_o zavisna od intenziteta turbulencije i kod izrazito turbulentnih tokova iznosi oko 1,5.

Fizika pojave je suštinski određena vrednošću koeficijenta apsorpcije K_1 , odnosno K_2 . Klasičan pristup u proceni vrednosti ovog koeficijenta potiče od O’Konora (O’Connor) i Dobinsa (Dobbins) [2, 4]. Ovi autori polaze od pretpostavke da kiseonik prodire u zapreminu \forall kroz laminarni film na površini, čija je debljina δ_1 (Slika 1.2), a u kome se prenos obavlja posredstvom molekularne difuzije.

Pretpostavlja se da se ovaj sloj neprestalno obnavlja česticama vode koje nisu zasićene kiseonikom, što se pripisuje uticajima turbulencije. Prag prenosa preke



Slika 1.2: Apsorpcioni sloj na površini vode

jedne čestice na površini zavisi od vremenskog intervala u toku koga je ta čestica izložena atmosferi. Taj interval je slučajna veličina sa eksponencijalnim zakonom raspodele:

$$f(t) = r_1 \cdot \exp(-r_1 t), \quad (1.3)$$

gde je $f(t) dt$ - udeo površine koja „traje“ od trenutka t do trenutka $t + \Delta t$, a r_1 – prag obnavljanja površine (parametar raspodele).

Unutar laminarnog filma se obavlja difuzija kiseonika po Fikovom (Fick) zakonu molekularne difuzije:

$$\frac{\partial m}{\partial t} = -D_m \cdot \Omega \cdot \frac{\partial C}{\partial z'}, \quad (1.4)$$

gde je član na levoj strani prag transfera kiseonika mase m , D_m – koeficijent molekularne difuzije kiseonika unutar vodenog filma, z' – vertikalna koordinata, a C – srednja koncentracija kiseonika u prelaznom sloju u vremenskom intervalu čija je raspodela definisana izrazom (1.3).

Jednačina (1.4) se integriše uz granični uslov na kontaktnoj površini: $C = C_{zas}$, pa se dobija rešenje:

$$\frac{dm}{dt} = (C_{zas} - C) \cdot (D_m \cdot r)^{1/2} \cdot \text{cth} \left(\frac{r_1 \cdot \delta_1}{D_m} \right)^{1/2}. \quad (1.5)$$

Upredjenjem ove jednačine sa jednačinom (1.1) daje mogućnost definicije koeficijenta apsorpcije:

$$K_1 = (D_m \cdot r_1)^{1/2} \cdot \text{cth} \left(\frac{r_1 \cdot \delta_1}{D_m} \right)^{1/2}. \quad (1.6)$$

Prag obnavljanja kiseonika na površini je:

$$r_1 = \frac{du_1}{dz}, \quad (1.7)$$

gde je u_1 – horizontalna komponenta brzine toka pri površini.

Postoji veliki broj empirijskih i poluempirijskih izraza za definisanje parametara r_1 i δ_1 . Ta činjenica sama po sebi ukazuje na velike probleme u definisanju površine Ω . U opštem obliku se koeficijent reoksigenacije može predstaviti ovako:

$$K_2 = \frac{C_K \cdot V^a}{H^b}, \quad (1.8)$$

gde je V – srednja profilska brzina, $H = A/B$ – srednja dubina toka, a , b i C_K – empirijski koeficijenti, od kojih poslednji, zavisi od temperature vode.

Vrednosti eksponenata a i b variraju u širokim granicama prema raznim autorima, što je posledica težnje da se vrlo složeni procesi i mnoštvo međusobno povezanih hidrodinamičkih faktora (naročito onih koji karakterišu turbulenciju toka), obuhvate sa samo dve, lako merljive veličine – V i H . Zato empirijske formule tipa (1.8) imaju ograničenu upotrebnu vrednost, jer važe samo za one uslove pod kojima su izvedene, a svaka ekstrapolacija je nepouzdana.

U razmatranju fenomena reoksigenacije moraju se imati u vidu sledeća dva ključna uticaja.

Temperatura vode utiče na koncentraciju zasićenja C_{zas} i na vrednost koeficijenta reoksigenacije K_1 , odnosno K_2 .

Koncentracija zasićenja je opadajuća funkcija temperature, koja se može, za atmosferski pritisak od 760 mm živinog stuba, definisati empirijskim izrazom:

$$C_{zas} = 475 / (33,5 + T), \quad (1.9)$$

gde je temperatura T izražena u stepenima Celzijusa ($^{\circ}\text{C}$).

Vrednost koeficijenta apsorpcije ili reoksigenacije takodje zavisi od temperature, jer ova direktno potstiče difuziju gasova u vodi. Za dati gas međjutim, uticaj temperature zavisi i od stepena turbulentnosti toka. Uticaj temperature na vrednost koeficijenta K_2 se uvodi sledećom korekcijom:

$$K_2(T) = K_2(20^{\circ}\text{C}) \cdot \theta^{T-20^{\circ}\text{C}}, \quad (1.10)$$

pri čemu vrednosti faktora θ variraju u opsegu: $\theta = 1,008 \div 1,047$.

Hidrotehnički objekti takodje utiču na proces reoksigenacije. Na primer, pragovi ili pregrade ubrzavaju taj proces pospešujući turbulenciju. Efekti povećane turbulencije se odražavaju kroz povećanje kontantne površine vazduh – voda, povećanje praga obnavljanja absorpcionog filma, a smanjenje njegove debljine, što doprinosi ubrzanju mešanja (difuzije) rastvorenog kiseonika.

Uticađ hidrotehničkih objekata se teško kvantifikuje. Teorija O’Konora i Dobinsa daje racionalnu osnovu za parametrizaciju procesa reoksigenacije, ali se kvantitativne procene za sada mogu dati isključivo na bazi niza empirijskih izraza, od kojih se ovde navodi samo onaj koji potiče od Džemsona (Gameson) [3]:

$$\frac{C_{zas} - C_2}{C_{zas} - C_1} = 1 + 0,037 \cdot c \cdot d \cdot (1 + 0,046 \cdot T) \cdot p, \quad (1.11)$$

gde su: C_1 i C_2 – koncentracije rastvorenog kiseonika uzvodno i nizvodno od praga pregrade čija je visina p [m], T – temperatura [°C], c – empirijski koeficijent kvaliteta vode ($c = 1,4$ za čistu, a $c = 0,65$ za vrlo zagađenu vodu), d – koeficijent koji zavisi od oblika praga ili pregrade, visine prelivnog mlaza i dubine donje vode ($d = 1,0 \div 1,3$).

1.2.2 Fotosinteza

U vodi koja sadrži lebdeće biljke (alge, fitoplanktoni itd.), kao i biljke koje su ukorenjene u koritu, dolazi do stvaranja kiseonika pod hlorofilenskim uticajima, posredstvom svetlosti. Ovi uticaji se manifestuju cikličnim varijacijama rastvorenog kiseonika u toku 24 sata, sa minimalnim nivoom na kraju noći – neposredno pred zoru, a maksimalnim, sredinom poslepodneva. Varijacije postoje i na sezonskom planu, u zavisnosti od trajanja dana, odnosno insolacije. Ovi uticaji mogu biti tako intenzivni, da ponekad može doći do prolazne hiperzasićenosti rastvorenim kiseonikom.

Fotosinteza se obdvija na mestima gde to turbulencija toka dozvoljava. Vodene biljke stvaraju kiseonik, ali ga i troše za respiraciju, a ta potrošnja nije konstantna u vremenu. Reč je o vrlo složenim procesima, koji se moraju razumeti da bi se korektno interpretirala merenja rastvorenog kiseonika u prirodi. To znači da poredjenje dve koncentracije izmerene u dva rečna profila u dva vremenska trenutka nema smisla ako se ne izvrši korekcija uticaja fotosinteze.

1.3 Potrošnja kiseonika

1.3.1 Biološka oksidacija organskih materija

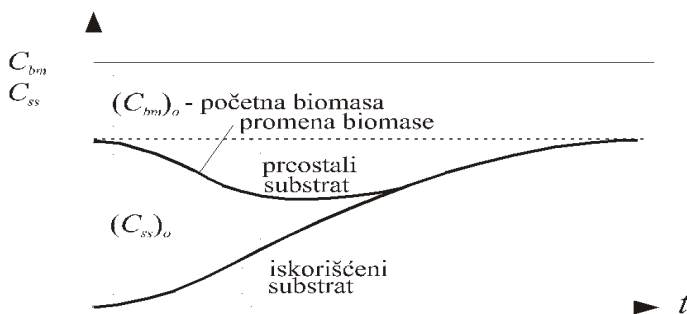
Hemijske reakcije koje se odvijaju prilikom razlaganja organskih materija potstaknute su bakterijama, posredstvom odredjenih enzima. Katalizatorsko svojstvo enzima, nakon što ga emituju bakterije, ogleda se u razlaganju hranljivih materija

iz substrata, pomoću kiseonika rastvorenog u vodi. Step en iskorišćenja substrata nije samo vezan za njegovu koncentraciju u vodi, već i za koncentraciju bakterija. Kinetika bakteriološke koncentracije C_{bm} i koncentracije substrata C_{ss} definisana je u vidu funkcija:

$$\left. \begin{aligned} -\frac{dC_{ss}}{dt} &= c_3 \cdot \frac{C_{bm} \cdot C_{ss}}{K_3 + C_{ss}} \\ \frac{dC_{bm}}{dt} &= a_3 \cdot \frac{dC_{ss}}{dt} - b_3 \cdot C_{bm}, \end{aligned} \right\} \quad (1.12)$$

gde su a_3, b_3, c_3 i K_3 - empirijski parametri.

Druga jednačina sistema (1.12) opisuje promenu koncentracije bakterija kao razliku njihove reprodukcije i izumiranja, a u zavisnosti od promene količine substrata. Na Slici 1.3 je shematski prikazana promena substrata i *biomase* – količine živih organizama (mikroorganizama i bakterija) u jediničnoj zapremini.



Slika 1.3: Vremenska promena supstrata i biomase

Razlaganje organskih materija se obavlja u nekoliko faza:

(i) u prvoj fazi se ugljenični elementi redukuju hemijskom reakcijom:



(ii) u drugoj fazi sledi redukcija azotnih elemenata:



u dve etape:

- posredstvom nitrosolnih bakterija:



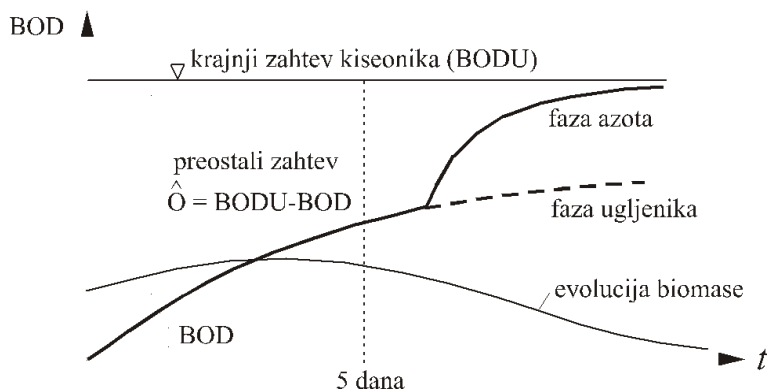
-posredstvom nitro-bakterija:



Bakterije koje učestvuju u lancu azota su jako osjetljive na pH vode.

1.3.2 Mere potrošnje kiseonika

Potreba za kiseonikom u razlaganju organskih materija se izražava veličinom BOD (engl. *biological oxigen demand*). Ova veličina se meri pomoću testa BOD₅. Reč je o količini kiseonika u uzorku rečne vode, utrošenoj za 5 dana pri konstantnoj temperaturi od 20°C. BOD₅ je reprezentativni indeks potrošnje kiseonika, ali nije tačan pokazatelj te potrošnje. Promena BOD po vremenu prikazana je shematski na Slici 1.4. Mogu se izvući sledeći zaključci. Kriva zahteva ima asimptotu koja



Slika 1.4: Promena indeksa biološke potrošnje kiseonika (BOD)

odgovara nekom krajnjem (ili ukupnom) zahtevu kiseonika BODU, koji je potreban za razgradnju svih organskih materija u vodi. Interval od 5 dana koji se koristi za test BOD₅, odgovara „fazi ugljenika” ili „fazi azota”, u zavisnosti od starosti zagađivača u trenutku zahvatanja uzorka rečne vode.

Promena BOD se u opštem slučaju prikazuje kao reakcija prvog reda:

$$\frac{d\hat{O}}{dt} = -K_{deg} \cdot \hat{O} \quad (1.17)$$

gde je $\hat{O} = \text{BODU} - \text{BOD}(t)$ – preostali zahtev, a K_{deg} – konstanta razlaganja (degradacije).

Zavisnost (1.17) je posledica vrlo uprošćenog pristupa. Ranije je rečeno da stepen potrošnje substrata ne zavisi samo od preostale količine kiseonika, već i od koncentracije biomase. Zato u literaturi postoje i složeniji modeli od onog koji opisuje jednačina (1.17). Ti modeli obuhvataju interakciju supstrat – biomasa. Međutim, korišćenje složenih modela zahteva opsežna merenja. Model prvog reda (1.17) omogućava lakšu procenu pod uslovom da se koeficijent razlaganja K_{deg} shvati kao statistički pokazatelj trajanja reakcije¹.

Temperatura vode utiče na razlaganje, ubrzavajući ili usporavajući opisani proces. Uticaj temperature se može uvesti korekcijom:

$$K_{deg}(T) = K_{deg}(20^{\circ}\text{C}) \cdot \theta^{(T-20^{\circ}\text{C})}, \quad (1.18)$$

gde je uobičajeno da se u temperaturnom opsegu $T = 15 \div 25^{\circ}\text{C}$ usvoji vrednost faktora $\theta = 1,047$. Ovu vrednost treba obazrivo koristiti, imajući u vidu globalni karakter koeficijenta K_{deg} i uprošćen karakter modela (1.17).

1.3.3 Naslage na dnu i respiracija biljaka

Sa opadanjem brzine toka, rastu naslage na rečnom dnu. Sa stanovišta bilansa kiseonika, dno se sastoji od dva sloja:

(a) u gornji, aerobni sloj (blato), kiseonik prodire difuzijom; ovaj sloj se prihranjuje organskim materijama kroz proces taloženja zagađivača;

(b) u donjem, anaerobnom sloju, sadržani su ostaci anaerobnih reakcija, kao što su CO_2 , CH_4 , SH_2 itd., koji se zatim, difuzijom pronose u rečni tok.

1.4 Model globalnog bilansa kiseonika

Globalna potrošnja kiseonika se obično izražava u obliku *specifične* potrošnje, po jedinici površine $[\text{gO}_2/\text{m}^2]$. Ova potrošnja se može odrediti jedino terenskim merenjem.

Na osnovu prethodno opisanih komponenti bilansa kiseonika u vodotoku, mogu se formirati matematički modeli, sa većim ili manjim stepenom uprošćenja prirodnih uslova. Opšta jednačina bilansa ima sledeći oblik:

$$\frac{DC}{Dt} = R + P - C_B - C_C - F, \quad (1.19)$$

¹U prirodi, vrednost ovog parametra zavisi od vrste organske materije koja se razlaže i od stepena razlaganja zagađivača u svakom pojedinačnom uzorku. Fizički realniji model bi se bazirao na razlikovanju dve faze („ugljenika” i „azota”) u evoluciji BOD, pri čemu bi svakoj fazi odgovarala jedna reakcija prvog reda [3].

gde je DC/Dt – materijalni izvod koncentracije kiseonika, R – reoksigenacija na površini, P – fotosinteza, C_B – biohemijska potrošnja kiseonika, C_C – hemijska potrošnja kiseonika, F – potrošnja kiseonika u sklopu respiracije blatnih naslaga na dnu i vodenih biljaka.

Po definiciji, materijalni izvod obuhvata članove konventivnog i difuzionog transporta koncentracije kiseonika C .

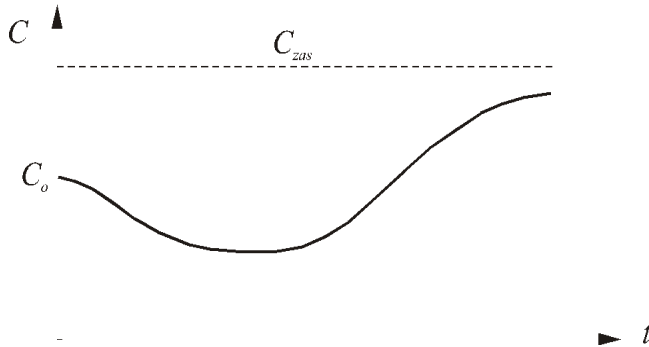
Svaki od članova u bilansnoj jednačini (1.19) je podložan uprošćenom definisanju. Kako ove članove nije moguće uopšteno definisati, neophodno ih je definisati za svako konkretno zagađenje, na osnovu rezultata merenja. Ta merenja su međjutim, vrlo osetljiva, skupa i dugotrajna.

Jedan od uprošćenih, ali upotrebljivih modela, je klasični model Stritera (Streeter) i Felpsa (Phelps), koji je predložen još 1925. godine [2]. Ovaj model uzima u obzir samo članove reoksigenacije i biološke razgradnje („biodegradacije”), kao reakcije prvog reda, u funkciji preostalog zahteva za kiseonikom:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dC}{dt} &= V \frac{dC}{dx} = K_6 (C_{zas} - C) - K_5 \cdot \hat{O} \\ \frac{d\hat{O}}{dt} &= V \frac{d\hat{O}}{dx} = K_5 \cdot \hat{O} \end{aligned} \right\} \quad (1.20)$$

gde je x – odstojanje u pravcu toka, a V – srednja profilaska brzina.

Model opisan jednačinama (1.20) važi za ustaljeno jednoliko tečenje. Imajući u vidu složenost prirodnih procesa, evidentno je da je taj model veoma uprošćen i da ne obuhvata niz fenomena. Pa ipak, on je u stanju da kvalitativno opiše evoluciju koncentracije kiseonika po vremenu, kao što je shematski prikazano na Slici 1.5.



Slika 1.5: Vremenska promena koncentracije kiseonika u rečnom toku

U korišćenju opisanog determinističkog modela treba imati u vidu nekoliko važnih činjenica. Korišćenje empirijskih formula za određivanje vrednosti globalnih koeficijenata K_5 i K_6 može dovesti do velikih grešaka u modelu bilansa, s obzirom da se fizičko-hemijski uticaji, kao i uticaji turbulentne strukture toka i temperature vode, uvode na pojednostavljen način. Zato se preporučuje procena vrednosti parametara modela na osnovu merenja koja bi se sprovedla za svaki konkretni zagadjivač i vodotok. Pri tome se mora voditi računa da se pojedini članovi bilansa izražavaju preko indeksa BOD (odnosno BOD_5) i da je greška procene ovih veličina do 30%.

Iz svega što je rečeno, proizilazi da je tačnost opisanog modela uslovljena: (a) greškom merenja u postupku kalibracije parametara i (b) greškom izostavljanja nekih komponenti bilansa, kao što je na primer fotosinteza, respiracija blatnih naslaga i rečnih biljaka, što znači da model vrlog grubo opisuje biološke i biohemijske reakcije.

Danas se smatra da su stohastički modeli bilansa rastvorenog kiseonika u prirodnim vodotocima bolji i tačniji pristup u pokušaju kvantifikacije ovog složenog prirodnog fenomena. Reč je o modelima koji se zasnivaju na uvođenju slučajne komponente u drugi član na desnoj strani prve jednačine modela (1.20) [2]. Međutim, čak i takav model se praktično ne može koristiti bez verifikacije na osnovu izmerenih vrednosti BOD i dovoljnog fonda podataka o koncentraciji rastvorenog kiseonika.

Literatura

- [1] Dobbins, W.E., *BOD and Oxygen Relationships in Stream*, Journal of Sanitary Eng. Division, ASCE, Vol. 90, No. 3, 1964.
- [2] Lebreton, J.C., *Dynamique fluviale*, Eyrolles, Paris, 1974.
- [3] Lefort, D., *Modèles mathématiques de pollution de rivière*, La Houille Blanche, No. 8, 1971.
- [4] O'Connor, D.J., Dobbins, W.E., *Mechanism of reaeration in natural streams*, Transactions ASCE., Vol. 123, 1958.

Sadržaj

1 Samoprečišćavanje prirodnih vodotoka	1
1.1 Ekološki sistem	1
1.2 Izvori kiseonika	3
1.2.1 Reoksigenacija preko površine vode	3
1.2.2 Fotosinteza	6
1.3 Potrošnja kiseonika	6
1.3.1 Biološka oksidacija organskih materija	6
1.3.2 Mere potrošnje kiseonika	8
1.3.3 Naslage na dnu i respiracija biljaka	9
1.4 Model globalnog bilansa kiseonika	9