

# Predviđanje svojstava slojne vode korištenjem novog prediktivnog alata i Vandermondove matrice

A. Bahadori

IZVORNI ZNANSTVENI ČLANAK

Proizvodnja mokre sirove nafte je zbog podizanja kontakta nafta-voda na mnogim naftnim poljima sve veći problem i zbog toga proizvodnja slane mokre nafte utiče na kvalitetu sirove nafte. U ovom radu je predstavljena jednostavna metoda za procjenu svojstava slojne vode korištenjem Arrhenius-ove funkcije i Vandermondove matrice za temperature iznad 30 °C i sadržaja soli između 5 i 25% masenog postotka. Ustanovljeno je da se procjene odlično poklapaju s vjerodostojnim podacima iz literature sa srednjim apsolutnim odstupanjem koje varira između 0,08 do 2,7%. Metoda koja je razvijena u ovoj studiji je od velike važnosti za naftne inženjere i inženjere u praksi jer im omogućava brzu provjeru svojstava slojne vode kod različitih uvjeta bez potrebe izbora bilo koje eksperimentalne metode. Kemijski i naftni inženjeri će ustanoviti da je predloženi pristup prilagođen korisniku s transparentnim izračunima koji ne uključuju složene izraze.

*Ključne riječi:* slojna voda, korelacija, proizvodno inženjerstvo, matematičko modeliranje

## 1. Uvod

Većina naftnih bušotina kroz svoj životni vijek na kraju proizvede neku količinu slojne vode. Povećana proizvodnja vode se obično manifestira značajnim rastom vodno-naftnog faktora (WOR) bušotine. Rast WORa bušotine uzrokuje skupu obradu te vode, smanjuje efikasnost mehanizma podizanja fluida a zahvaćena bušotina može biti rano napuštena i razlog je za gubitak ukupne proizvodnje polja a slojna voda je korozivna i njeno odlaganje postaje skupo. Gotovo sva ležišta ugljikovodika su okružena stijenama natopljenih vodom nazvanih akvifer (vodonosni sloj).<sup>1</sup> Ti akviferi mogu biti znatno veći od ležišta nafte i plina kojima su pripojeni pa se čini da su beskonačno veliki, ili pak mogu biti mali po dimenzijama i zanemarivi po svom djelovanju na učinkovitost iskorištavanja ležišta.<sup>1,11</sup> U ležištima ugljikovodika vodeni konus se pojavljuje iznad kontakta nafte i vode, koja se kreće prema gore u perforacijske kanale proizvodne bušotine pa to može imati ozbiljan učinak na produktivnost bušotine i utjecati na stupanj iscrpljivanja i opću učinkovitost pridobivanja naftnih ležišta. Proizvodnja mokre nafte zbog dizanja kontakta nafta-voda je na mnogim naftnim poljima rastući problem a proizvodnja slane mokre nafte utječe na kvalitetu sirove nafte pa su mnogobrojne bušotine morale biti zatvorene zbog nedostatka adekvatnih uređaja za njenu obradu.<sup>20</sup> Proizvedena voda sa sirovom naftom na naftnim poljima obično sadrži sol u koncentraciji 150 000 do 220 000 ppm (15 do 22 masenog postotka).<sup>19</sup>

Otkriveno je da je salinitet vezane vode primarni čimbenik kontrole pridobivanja nafte.<sup>18,17</sup> Objavljeno je mnogo članaka koji upućuju na različita tehnička pitanja glede slojne vode.<sup>14,3,12,5,9</sup> Budući da do ovog trenutka u literaturi ne postoji računalni program jednostavan za

korištenje za brzu procjenu svojstava slojne vode (tlak, entalpija i gustoća fluida kojim je zasićena stijena) naši su napori bili usmjereni ka stvaranju jednostavnog računalnog programa korištenjem programskog jezika Matlab.<sup>10</sup> Očekuje se da će program biti od pomoći inženjerima za brzi izračun svojstava slojne vode (tlak entalpija i gustoća) korištenjem Arrheniusove asimptotske eksponencijalne funkcije. U ovom radu preloženi su novi jednostavni alati i jedinstvene formulacije koje ne postoje u literaturi. Osim toga selektirana eksponencijalna funkcija za razvoj alata dovodi do jednadžbi koje se dobro ponašaju (tj. one su izglađene i neoscilirajuće) i omogućuju brza i sigurnija predviđanja.

## 2. Metodika razvoja jednostavnog računalnog programa na temelju Matlab-a

Primarna namjena ove studije je sigurna korelacija podataka svojstava slojne vode<sup>4</sup> kao funkcije temperature i sadržaja soli (maseni udio). To je napravljeno s jednostavnim računalnim programom korištenjem Arrhenius-ove asimptotske eksponencijalne funkcije s malom preinakom Vogel-Tammann-Fulcherove (VTF) jednadžbe.<sup>16,15,6</sup>

To je važno jer je takva sigurna i matematički jednostavna korelacija svojstava slojne vode kao funkcije temperature i sadržaja soli slojne vode često potrebna za brze inženjerske proračune, kako bi se izbjegla dodatna izračunavanja opterećena složenim izračunima. Vogel-Tammann-Fulcherova (VTF)<sup>16,15,6</sup> jednadžba je asimptotska eksponencijalna funkcija prikazana u slijedećem obliku:

$$\ln f = \ln(f_c) - \frac{E}{R(T - T_c)} \quad (1)$$

U jednadžbi (1)  $f$  je pravilno određen parametar ovisnosti o temperaturi za kojega su jedinice određene pojedinačno za pojedina svojstva.  $f_c$  je predeksponencijalni koeficijent čija je jedinica jednaka onoj koju ima objekt interesa.  $T$  i  $T_c$  su stvarne temperature odnosno karakteristična granična temperatura (obje u stupnjevima Kelvina),  $E$  je aktivacijska energija procesa koja uzrokuje varijacije parametra (u jedinicama J/kmol) i  $R$  je univerzalna plinska konstanta ( $R$ ) 8,314 J/(kmol K). Poseban slučaj Vogel-Tammann-Fulcherove (VFT) jednadžbe<sup>16,15,6</sup> za  $T_c = 0$  je dobro poznata Arrheniusova<sup>2</sup> jednadžba. U svrhu ovdje predstavljene aplikacije koja uključuje korelaciju svojstava slojne vode kao funkcije temperature Vogel-Tammann-Fulcherove (VFT) jednadžba<sup>16,15,6</sup> je pribrajanjem članova drugog i trećeg reda promijenjena u slijedeći oblik:

$$\ln f = \ln f_c + \frac{b}{T - T_c} + \frac{c}{(T - T_c)^2} + \frac{d}{(T - T_c)^3} \quad (2)$$

U jednadžbi (2) za  $T_c$  je uvrštena vrijednost 0 za konverziju jednadžbe u dobro poznatu Arrheniusovu jednadžbu (3).

$$\ln f = \ln f_c + \frac{b}{T} + \frac{c}{T^2} + \frac{d}{T^3} \quad (3)$$

Podaci potrebni za razvijanje ove korelacije uključuju podatke istraživanja za svojstva slojne vode ležišta (slana voda) kao funkcije temperature i saliniteta slojne vode. Za razvijanje ove korelacije primijenjena je slijedeća metoda.

## 2.1 Vandermondeova matrica

Vandermondeova matrica je matrica s članovima geometrijske progresije u svakom retku tj.  $m \times n$  matrica.<sup>8</sup>

$$V = \begin{bmatrix} 1 & \alpha_1 & \alpha_1^2 & \dots & \alpha_1^{n-1} \\ 1 & \alpha_2 & \alpha_2^2 & \dots & \alpha_2^{n-1} \\ 1 & \alpha_3 & \alpha_3^2 & \dots & \alpha_3^{n-1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & \alpha_m & \alpha_m^2 & \dots & \alpha_m^{n-1} \end{bmatrix} \quad (4)$$

ili

$$V_{i,j} = \alpha_i^{j-1} \quad (5)$$

Za sve indekse  $i$  i  $j$  determinanta kvadratne Vandermondeove matrice (gdje je  $m = n$ ) može se prikazati kao:<sup>9</sup>

$$\det(V) = \prod_{i < j} (\alpha_j - \alpha_i) \quad (6)$$

Vandermondeova matrica procjenjuje polinom na grupi točaka bitno je da ona transformira koeficijente polinoma  $a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_{n-1}x^{n-1}$  na vrijednosti koje polinom ima na točkama  $\alpha_i$ . Vandermondeova determinanta koja je za različite točke  $\alpha_i$  uvijek različita od nule pokazuje da se za različite točke mapiranje iz koeficijenata na vrijednosti na tim točkama jedan-prema-jedan slaganje i tako problem polinomne interpolacije ima jedinstveno rješenje a rezultat se naziva "teorem sa samo jednim rješenjem".<sup>7</sup> Koristi se u polinomnoj interpolaciji budući da je rješavanjem sustava linearnih jednadžbi  $Vu = y$  za  $u$  s  $V$  i  $m \times n$  Vandermondeova matrica istovjetna nalaženju koeficijenata u polinoma.<sup>7</sup>

$$P'(x) = \sum_{j=0}^{n-1} u_j x^j \quad (7)$$

stupnja  $\leq n-1$  koji ima slijedeću osobinu:

$$P'(\alpha_i) = y_i, \text{ za } i=1 \dots m \quad (8)$$

Vandermondeova matrica može se lagano invertirati pomoću Lagranževih baznih polinoma. Svaki stupac je

Tablica 1. Podešeni koeficijenti korišteni u jednadžbama 12 to 15

Koeficijent	Vrijednosti gustoće slojne vode	Vrijednosti tlaka pare slojne vode	Vrijednosti entalpije slojne vode
$A_1$	4,063244865	-7,04556549	1,797809351x10 <sup>1</sup>
$B_1$	1,000079593x10 <sup>1</sup>	1,307249067x10 <sup>2</sup>	-2,655643093
$C_1$	-8,795847952	-9,95570818x10 <sup>2</sup>	-2,150551077
$D_1$	-1,577395814x10 <sup>1</sup>	2,249083079x10 <sup>3</sup>	1,048046517x10 <sup>1</sup>
$A_2$	2,558887165x10 <sup>3</sup>	3,089756019x10 <sup>4</sup>	-3,689786089x10 <sup>3</sup>
$B_2$	-9,052509303x10 <sup>3</sup>	-1,896459828x10 <sup>5</sup>	1,445893286x10 <sup>3</sup>
$C_2$	9,904460862x10 <sup>3</sup>	1,440423792x10 <sup>6</sup>	1,556796014x10 <sup>3</sup>
$D_2$	1,196976637x10 <sup>4</sup>	-3,267875129x10 <sup>7</sup>	-7,015035019x10 <sup>3</sup>
$A_3$	-7,950125161x10 <sup>5</sup>	-1,721360113x10 <sup>7</sup>	1,188424501x10 <sup>6</sup>
$B_3$	2,990313240x10 <sup>6</sup>	9,032945444x10 <sup>6</sup>	-4,657607524x10 <sup>5</sup>
$B_4$	-3,408171801x10 <sup>8</sup>	-1,418915942x10 <sup>10</sup>	7,542204755x10 <sup>7</sup>
$C_4$	4,617706624x10 <sup>8</sup>	1,084009226x10 <sup>11</sup>	8,114755519x10 <sup>7</sup>
$D_4$	2,507241284x10 <sup>9</sup>	-2,472823251x10 <sup>11</sup>	-3,657489476x10 <sup>8</sup>

Tablica 2. Točnost računalnog programa za izračun gustoće slane vode				
Temperatura °C	Sadržaj soli prirodne slane vode udio	Gustoća (prijašnja istraživanja) kg/m (Denver Research Institute 1964. Dittman 1977.)	Izračunata gustoća kg/m³	Apsolutno odstupanje (%)
38	0,05	1094	1094,78	0,07
66	0,05	1059	1057,26	0,22
93	0,05	1025	1024,31	0,08
121	0,05	991	991,43	0,07
149	0,05	956	957,43	0,12
177	0,05	922	922,42	0,06
204	0,05	887	886,94	0,05
232	0,05	853	851,57	0,17
260	0,05	819	816,85	0,21
288	0,05	784	783,18	0,12
316	0,05	750	750,83	0,16
38	0,1	1118	1118,85	0,04
66	0,1	1087	1085,19	0,18
93	0,1	1056	1055,22	0,07
121	0,1	1025	1025,31	0,06
149	0,1	993	994,49	0,10
177	0,1	962	962,84	0,06
204	0,1	931	930,80	0,02
232	0,1	900	898,86	0,10
260	0,1	869	867,45	0,12
288	0,1	837	836,91	0,04
316	0,1	806	807,47	0,18
38	0,15	1143	1143,35	0,02
66	0,15	1115	1113,24	0,16
93	0,15	1087	1086,14	0,08
121	0,15	1059	1059,08	0,01
149	0,15	1031	1031,27	0,03
177	0,15	1003	1002,79	0,01
204	0,15	975	973,99	0,09
232	0,15	947	945,27	0,17
260	0,15	919	916,98	0,20
288	0,15	891	889,42	0,15
316	0,15	863	862,78	0,00
38	0,2	1169	1169,57	0,01
66	0,2	1144	1142,31	0,14
93	0,2	1118	1117,58	0,06
121	0,2	1093	1092,88	0,02
149	0,2	1067	1067,55	0,05
177	0,2	1041	1041,65	0,03
204	0,2	1016	1015,49	0,02
232	0,2	990	989,39	0,07
260	0,2	965	963,66	0,08
288	0,2	939	938,55	0,03
316	0,2	913	914,23	0,11
38	0,25	1199	1198,93	0,00
66	0,25	1175	1173,40	0,13
93	0,25	1151	1150,12	0,07
121	0,25	1127	1126,87	0,00
149	0,25	1103	1103,05	0,02
177	0,25	1079	1078,73	0,01
204	0,25	1055	1054,16	0,06
232	0,25	1031	1029,65	0,11
260	0,25	1007	1005,48	0,13
288	0,25	983	981,86	0,09
316	0,25	959	958,95	0,03
Srednje odstupanje %				0,08

Tablica 3. Točnost računalnog programa za izračun entalpije slane vode				
Temperatura °C	Sadržaj soli prirodne slane vode udio	Gustoća (prijašnja istraživanja) kg/m (Denver Research Institute 1964. Dittman 1977.)	Izračunata gustoća kg/m <sup>3</sup>	Apsolutno odstupanje (%)
38	0,05	160269	160550,28	0,18
66	0,05	260669	259265,70	0,54
93	0,05	368100	368093,94	0,00
121	0,05	481082	482389,67	0,27
149	0,05	598695	600081,11	0,23
177	0,05	720302	720659,76	0,05
204	0,05	845438	844275,61	0,14
232	0,05	973743	971459,76	0,23
260	0,05	1104931	1102636,50	0,21
288	0,05	1238768	1238206,71	0,05
316	0,05	1375058	1378473,39	0,25
38	0,1	157903	158367,75	0,29
66	0,1	254231	253115,55	0,44
93	0,1	356436	356660,23	0,06
121	0,1	463246	464691,88	0,31
149	0,1	573876	575354,31	0,26
177	0,1	687787	688245,37	0,07
204	0,1	804584	803557,07	0,13
232	0,1	923964	921817,62	0,23
260	0,1	1045687	1043441,31	0,21
288	0,1	1169558	1168811,15	0,06
316	0,1	1295413	1298213,10	0,22
38	0,15	156241	156298,32	0,04
66	0,15	248857	247332,90	0,61
93	0,15	346241	345983,27	0,07
121	0,15	447334	448255,22	0,21
149	0,15	551483	552491,55	0,18
177	0,15	658244	658387,07	0,02
204	0,15	767294	766171,78	0,15
232	0,15	878385	876371,43	0,23
260	0,15	991322	989391,77	0,19
288	0,15	1105945	1105600,51	0,03
316	0,15	1222122	1225269,23	0,26
38	0,2	153803	154234,68	0,28
66	0,2	242935	241905,65	0,42
93	0,2	336006	336196,86	0,06
121	0,2	432119	433394,97	0,30
149	0,2	530728	532015,32	0,24
177	0,2	631463	631834,95	0,06
204	0,2	734054	733115,17	0,13
232	0,2	838297	836378,81	0,23
260	0,2	944028	942024,06	0,21
288	0,2	1051116	1050405,73	0,07
316	0,2	1159454	1161783,60	0,20
38	0,25	151849	152075,12	0,15
66	0,25	238037	236822,48	0,51
93	0,25	327465	327419,17	0,01
121	0,25	419381	420383,51	0,24
149	0,25	513331	514368,36	0,20
177	0,25	609006	609213,81	0,03
204	0,25	706183	705203,72	0,14
232	0,25	804693	802856,68	0,23
260	0,25	904402	902563,88	0,20
288	0,25	1005202	1004669,38	0,05
316	0,25	1107005	1109423,52	0,22
Srednje odstupanje %				0,19

Tablica 4. Točnost računalnog programa za izračunavanje tlaka pare slane vode

Temperatura °C	Sadržaj soli prirodne slane vode udio	Gustoća (prijašnja istraživanja) kg/m (Denver Research Institute 1964. Dittman 1977.)	Izračunata gustoća kg/m <sup>3</sup>	Apsolutno odstupanje (%)
93	0,05	135	129,87	4,27
130	0,05	261	276,84	5,81
140	0,05	348	352,16	0,95
150	0,05	465	449,94	3,26
160	0,05	600	575,19	4,26
170	0,05	765	733,62	4,17
180	0,05	969	931,44	3,88
190	0,05	1221	1175,28	3,74
200	0,05	1511	1471,90	2,63
210	0,05	1851	1828,03	1,23
220	0,05	2248	2249,99	0,08
230	0,05	2713	2743,44	1,11
240	0,05	3246	3313,05	2,06
250	0,05	3856	3962,22	2,74
260	0,05	4544	4692,84	3,26
270	0,05	5339	5505,06	3,11
280	0,05	6221	6397,21	2,83
290	0,05	7209	7365,72	2,17
300	0,05	8323	8405,16	0,98
310	0,05	9564	9508,32	0,58
320	0,05	10940	10666,41	2,50
330	0,05	12461	11869,26	4,75
93	0,1	131	123,78	5,34
130	0,1	252	267,54	6,09
140	0,1	336	340,61	1,30
150	0,1	448	435,23	2,92
160	0,1	579	556,21	3,95
170	0,1	738	708,96	3,92
180	0,1	934	899,43	3,70
190	0,1	1177	1133,91	3,65
200	0,1	1457	1418,90	2,62
210	0,1	1784	1760,86	1,29
220	0,1	2167	2165,92	0,04
230	0,1	2615	2639,65	0,94
240	0,1	3129	3186,75	1,85
250	0,1	3717	3810,77	2,51
260	0,1	4380	4513,93	3,05
270	0,1	5146	5296,89	2,93
280	0,1	5996	6158,65	2,71
290	0,1	6949	7096,45	2,12
300	0,1	8023	8105,82	1,03
310	0,1	9218	9180,63	0,41
320	0,1	10545	10313,22	2,20
330	0,1	12011	11494,62	4,30
93	0,15	125	119,64	4,41
130	0,15	241	256,09	6,09
140	0,15	321	325,74	1,21
150	0,15	429	416,05	3,05
160	0,15	554	531,61	4,09
170	0,15	706	677,66	4,05
180	0,15	894	859,88	3,82
190	0,15	1126	1084,36	3,74
200	0,15	1394	1357,33	2,67
210	0,15	1707	1684,98	1,32
220	0,15	2074	2073,18	0,04

Tablica 4. Nastavak...				
Temperatura °C	Sadržaj soli prirodne slane vode udio	Gustoća (prijašnja istraživanja) kg/m (Denver Research Institute 1964. Dittman 1977.)	Izračunata gustoća kg/m <sup>3</sup>	Apsolutno odstupanje (%)
230	0,15	2503	2527,21	0,96
240	0,15	2994	3051,50	1,89
250	0,15	3558	3649,35	2,56
260	0,15	4192	4322,71	3,10
270	0,15	4925	5072,02	2,97
280	0,15	5739	5896,04	2,73
290	0,15	6651	6791,86	2,11
300	0,15	7679	7754,85	0,98
310	0,15	8823	8778,80	0,51
320	0,15	10093	9856,02	2,35
330	0,15	11496	10977,53	4,52
93	0,2	118	113,73	4,09
130	0,2	228	242,35	5,97
140	0,2	304	308,22	1,08
150	0,2	406	393,70	3,16
160	0,2	525	503,18	4,18
170	0,2	669	641,62	4,11
180	0,2	847	814,46	3,84
190	0,2	1067	1027,47	3,72
200	0,2	1321	1286,58	2,63
210	0,2	1617	1597,65	1,24
220	0,2	1965	1966,24	0,06
230	0,2	2371	2397,29	1,08
240	0,2	2837	2894,93	2,03
250	0,2	3371	3462,17	2,70
260	0,2	3972	4100,71	3,23
270	0,2	4667	4810,76	3,08
280	0,2	5437	5590,92	2,82
290	0,2	6301	6438,16	2,17
300	0,2	7275	7347,83	0,99
310	0,2	8359	8313,72	0,55
320	0,2	9562	9328,24	2,45
330	0,2	10892	10382,58	4,68
93	0,25	111	103,10	7,25
130	0,25	214	226,33	5,57
140	0,25	285	288,71	1,00
150	0,25	381	369,42	3,07
160	0,25	492	472,53	4,01
170	0,25	627	602,65	3,92
180	0,25	794	764,79	3,68
190	0,25	1000	964,27	3,62
200	0,25	1238	1206,59	2,59
210	0,25	1516	1497,19	1,28
220	0,25	1842	1841,26	0,04
230	0,25	2223	2243,50	0,91
240	0,25	2659	2707,91	1,80
250	0,25	3160	3237,52	2,45
260	0,25	3723	3834,25	2,96
270	0,25	4374	4498,74	2,83
280	0,25	5097	5230,22	2,60
290	0,25	5907	6026,50	2,02
300	0,25	6820	6883,93	0,93
310	0,25	7836	7797,50	0,50
320	0,25	8964	8760,89	2,27
330	0,25	10210	9766,71	4,35
Srednje odstupanje %				2,7

koeficijent Lagranžeovog baznog polinoma s padajućim članovima u rastućem redu. Dobiveno rješenje problema interpolacije nazvano je Lagrangeov polinom.<sup>7</sup>

## 2.2 Razvoj računalnog programa

Prvo, podaci o svojstvima slojne vode<sup>4</sup> i to: tlak entalpija i gustoća fluida su korelirani kao funkcija temperature za nekoliko masenih udjela sadržaja soli u slojnoj vodi ( $\psi$ ). Nakon toga se koeficijenti izračunati za te jednadžbe koreliraju kao funkcija masenog udjela sadržaja soli u slojnoj vodi ( $\psi$ ). Izvedene jednadžbe primijenjene su za izračun novih koeficijenata za jednadžbe (9) (10) i (11) za predviđanje svojstava slojne vode. U tablici 1 prikazani su podešeni koeficijenti za jednadžbe (12) do (15) za predviđanje svojstava slojne vode.

1. Korelacija svojstava slojne vode (tlak, entalpija i gustoća fluida) kao funkcije temperature ( $T$ ) za dani sadržaj soli u masenom udjelu ( $\psi$ ).

2. Ponavljanje 1. koraka za drugi sadržaj soli u slojnoj vodi u masenom udjelu ( $\psi$ ).

3. Korelacija odgovarajućih koeficijenata polinoma dobivenih za različite temperature nasuprot sadržaju soli u slojnoj vodi u masenoj frakciji ( $\psi$ )  $a = f(\psi)$   $b = f(\psi)$   $c = f(\psi)$   $d = f(\psi)$  (vidi jednadžbe (12) - (15)).

Jednadžbe (9-11) predstavljaju predložene generalne jednadžbe u kojima su korištena četiri koeficijenta za korelaciju podataka svojstava slojne vode (tlak entalpija i gustoća fluida) kao funkcije temperature ( $T$ ) za dani sadržaj soli.. Relevantni koeficijenti dani su u tablici 1.

$$\ln(H) = a + \frac{b}{T} + \frac{c}{T^2} + \frac{d}{T^3} \quad (9)$$

$$\ln(\rho) = a + \frac{b}{T} + \frac{c}{T^2} + \frac{d}{T^3} \quad (10)$$

$$\ln(\rho) = a + \frac{b}{T} + \frac{c}{T^2} + \frac{d}{T^3} \quad (11)$$

gdje je:

$$a = A_1 + B_1\psi + C_1\psi^2 + D_1\psi^3 \quad (12)$$

$$b = A_2 + B_2\psi + C_2\psi^2 + D_2\psi^3 \quad (13)$$

$$c = A_3 + B_3\psi + C_3\psi^2 + D_3\psi^3 \quad (14)$$

$$d = A_4 + B_4\psi + C_4\psi^2 + D_4\psi^3 \quad (15)$$

Ovi optimalno podešeni koeficijenti obuhvaćaju temperature iznad 30 °C i sadržaj soli u slojnoj vodi do 0,30 masenog udjela. Optimalno podešeni koeficijenti dani su u tablici 1 i mogu se dodatno brzo podesiti u skladu s predloženim konceptom, ukoliko u budućnosti budu dostupni pouzdaniji podaci. Predloženi novi alat razvijen u ovom radu je jednostavan i jedinstvenog izraza koji ne postoji u literaturi. Osim toga izabrana eksponencijalna funkcija za razvoj alata dovodi do jednadžbi koje se dobro ponašaju (tj. one su izglađene i neoscilirajuće) i omogućuju brza i sigurnija predviđanja.

## 3. Rezultati

Na slikama 1 i 2 prikazana su svojstva računalnog programa predloženog za izračunavanje gustoće slojne

vode za dva različita slučaja, uz sadržaj soli u slojnoj vodi do 0,30 masenog udjela. Slike 3 i 4 prikazuju izvođenje računalnog programa za predviđanje tlaka pare slojne vode ponovo za dva slučaja te nekoliko računskih uvjeta. Slike 5 i 6 prikazuju rezultate računalnog programa za predviđanje entalpije slojne vode za dva spomenuta slučaja te nekoliko uvjeta. Tablice 2 - 4 prikazuju točnost predloženih računalnih programa za predviđanje gustoće te entalpije i tlaka pare slojne vode u usporedbi s podacima iz literature.<sup>4</sup> Točnost korelacije u smislu srednjeg apsolutnog odstupanja slojne vode iznosi 0,08 zatim kod entalpije 0,19 te kod tlaka pare 27%. Zadaci ove studije bili su usmjereni na oblikovanje jednostavno primjenjive inženjersko-istraživačke metode. Očekuje se da će naša nastojanja u ovom istraživanju otvoriti put za sigurno predviđanje svojstva slojne vode kod različitih uvjeta, a koji mogu koristiti inženjerima i znanstvenicima za povremeno praćenje ključnih parametara.

## 4. Zaključci

U ovom radu je predstavljen računalni program, jednostavan za korištenje, pomoću Arrheniusova modela za procjenu svojstava slojne vode (tlak, entalpija i gustoća fluida) za temperature iznad 30 °C i za sadržaj soli između 5 i 25%. Za razliku od kompleksnih matematičkih pristupa za određivanje tih svojstava predloženi računalni program je jednostavan za korištenje i trebao bi biti od velike pomoći procesnim inženjerima posebno onima koji se bave proizvodnjom nafte i inženjerima tehnologije razrade ležišta. Osim toga s matematičkim operacijama povezanim s procjenom svojstava slojne vode (slane vode) mogu lako baratati i stručnjaci i naftni inženjeri bez dubljeg poznavanja matematike. Prikazani primjer za korištenje inženjerima jasno pokazuje korisnost predloženih alata. Nadalje procjene su veoma točne što je potvrđeno usporedbom s podacima iz literature s prihvatljivim srednjim odstupanjima i trebale bi u kratkom vremenu pomoći kod dizajniranja i modifikacije postupka.



## Popis oznaka

<i>A</i>	Podešeni koeficijent
<i>B</i>	Podešeni koeficijent
<i>C</i>	Podešeni koeficijent
<i>D</i>	Podešeni koeficijent
<i>E</i>	energija aktivacije procesa koja uzrokuje varijaciju parametra (J/kmol);
<i>f</i>	pravilno određen parametar ovisnosti o temperaturi čije su jedinice određene pojedinačno za određeno svojstvo
<i>f<sub>c</sub></i>	predeksponencijalni koeficijent čija je jedinica jednaka onoj koju ima objekt interesa
<i>H</i>	entalpija slojne vode J/kg
<i>i</i>	indeks
<i>j</i>	indeks
<i>m</i>	indeks retka matrice za $m \times n$ matricu
<i>n</i>	indeks stupca matrice za $m \times n$ matricu
<i>p</i>	tlak pare slojne vode, kPa (aps)
<i>P'</i>	Polinom
<i>R</i>	univerzalna plinska konstanta ( <i>R</i> ) 8,314 J/(kmol K).
<i>T</i>	Temperatura, K, °C
<i>T<sub>c</sub></i>	karakteristična granična temperatura, K, °C
<i>u</i>	koeficijent polinoma
<i>V</i>	Vandermondova matrica
<i>α</i>	element matrice
<i>ψ</i>	Salinitet slojne vode (slana voda), maseni udio
<i>ρ</i>	Gustoća slojne vode (slane vode), kg/m <sup>3</sup>



Autor:

**Alireza Bahadori**, Environmental Innovations Research Centre, School of Environmental Science & Management, Southern Cross University, PO Box 157, Lismore, New South Wales, 2480, Australia  
e-mail: bahadori.alireza@gmail.com; al.bahadori@gmail.com  
Tel: +61 422 789 572

UDK : 622.276/.279 : 519.876.2

622.276/.279 pridobivanje, proizvodnja nafte i plina  
519.876.2 matematičko modeliranje