



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΤΙΤΛΟΣ: ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΕΛΑΧΙΣΤΗΣ ΠΙΕΣΗΣ
ΑΝΑΜΙΞΙΜΟΤΗΤΑΣ ΣΕ ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΕΙΣ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΥ ΜΕ ΕΙΣΠΙΕΣΗ ΑΕΡΙΟΥ**

ΣΩΤΗΡΙΟΣ Ν. ΖΕΡΒΑΣ

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

ΔΡ. ΝΙΚΟΛΑΟΣ ΒΑΡΟΤΣΗΣ, ΑΝΑΠΛΗΡΩΤΗΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ (ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ)

ΔΡ. ΖΑΧΑΡΙΑΣ ΑΓΙΟΥΤΑΝΤΗΣ, ΑΝΑΠΛΗΡΩΤΗΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

ΔΡ. ΓΕΩΡΓΙΟΣ ΕΞΑΔΑΚΤΥΛΟΣ, ΑΝΑΠΛΗΡΩΤΗΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

ΧΑΝΙΑ

ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΣ 1997

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Το θέμα της μεταπτυχιακής αυτής εργασίας επιλέχθηκε σε συνεργασία με επιχειρήσεις από το χώρο της παραγωγής πετρελαίου και ολοκληρώθηκε στο Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του Πολυτεχνείου Κρήτης

Η ολοκλήρωση της εργασίας δε θα ήταν εφικτή χωρίς την ουσιαστική και πολύτιμη βοήθεια που μου προσέφερε ο Αναπληρωτής Καθηγητής και επιβλέπωντας της εργασίας κ. Ν. Βαρότσης τον οποίο και ευχαριστώ θερμά.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τα στελέχη των επιχειρήσεων από το χώρο της παραγωγής πετρελαίου τα οποία με μεγάλη προθυμία προσέφεραν τα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν κατά την εκπόνηση αυτής της εργασίας καθώς και τον Δρ. Ν. Πασαδάκη για την πολύτιμη συνεργασία του.

Τέλος ευχαριστώ ιδιαίτερα την Τίνα Δρακωνάκη και τους γονείς μου για την συμπαράσταση και την ηθική υποστήριξη που μου προσέφεραν καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

ABSTRACT

RAPID MINIMUM MISCIBILITY PRESSURE PREDICTION FOR CONDENSING GAS DRIVE PROCESS

Zervas S. and Varotsis N.

**Department of Mineral Resources Engineering
Technical University of Crete**

SUMMARY

As a result of the mechanisms prevailing during the primary and secondary petroleum recovery methods vast quantities of hydrocarbons are trapped in the porous media and are not recoverable with conventional methods. Miscible displacement between the remaining oil and an injected gas such as LPG, CO₂, N₂ or lean gas constitutes the most promising method for bringing to the surface the maximum amount of the hydrocarbons trapped due to capillary forces.

This work describes a computational method for calculating the minimum operating pressure required for a given system of reservoir oil and injected gas to reach miscibility at the prevailing reservoir temperature. A first value for pressure is chosen and a proper mixing molar ratio between the oil and the selected injection gas is selected by the model to place the mixture in the diphasic region. The slope and the end points of the resulting tie-line are stored in the form of a ternary representation. The method subsequently searches for a new diphasic mixture composition richer in injection gas and its corresponding equilibrium lines are produced. The path for the overall mixture composition is guided towards the critical point and it is the slope of the tie-line which determines whether miscibility is attainable. The calculation is repeated at different pressures until a critical tie-line is found which passes through the gas composition. This pressure is considered as the minimum pressure at which miscible displacement of the oil by the injected gas can be achieved.

Robust computational methods are implemented to deal with difficulties in convergence around the critical point. These methods help to accelerate the calculations by providing quality initial estimates of the independent variables and by guessing the solution of the next step by tracing the change of slope of the critical tie-lines. The validity of the method has been tested against field data of Middle East oils and its performance is compared with the results of the time consuming experimental method of the single dimensional displacement in a slim tube.

INTRODUCTION

Miscible Displacement is a commonly used enhanced oil recovery technique which follows primary and secondary production, and improves oil recovery extracting the entire oil volume from the reservoir. Miscible Displacement is the process during which no boundary or interface between oil and displacing fluid exists.ⁱ There are four categories of miscible displacement processes¹: 1) high-pressure dry-gas miscible displacement, 2) rich-gas miscible displacement, 3) miscible slug using a slug of LPG followed by a lean dry gas under miscible conditions, 4) gas driven-slug process using a slug of LPG followed by a lean dry gas under immiscible conditions, or two categoriesⁱⁱ, a) First-Contact miscible process, b) Multiple-Contact miscible process divided into Condensing-Gas Drive and Vaporizing-Gas Drive processes.

A prominent parameter for the multiple-contact miscible process is the minimum miscibility pressure, defined as the pressure above which miscibility occurs for a given pair of reservoir oil and injection gas. The determination of minimum miscibility pressure (MMP) is very important in order to examine whether a reservoir with the specific oil can be miscibly displaced - totally recovered by an economically formed and transferred gas mixture.

Three approaches are usually employed to determine the minimum miscibility pressure, and these are slim tube displacement, multiple contact with a windowed PVT cell and Equation Of State (EOS) based programs.

The apparatus for the slim tube displacement experiment, consists of a tube packed with sand saturated with oil at the desired temperature and pressure, a supply cylinder filled with solvent (at test temperature and pressure) and a pump which moves the solvent inside the sand.ⁱⁱⁱ For this procedure MMP is the pressure at which oil recovery is 97% or higher.

The MMP determination using a windowed PVT cell is based on a step-wise procedure, where the equilibrium oil is mixed with the injection gas, at constant pressure and temperature, flashing to equilibrium gas and oil. This procedure stops either when the mixture becomes monophasic (miscibility), or when the equilibrium gas percentage stops decreasing (immiscibility), and illustrates the condensing gas-drive process.

MMP can also be predicted by using phase behaviour simulators based on EOS, and fluid descriptions with parameters tuned to match laboratory data, such as differential vaporization analysis (VDA) and PVT tests.^{iv}

Phase behaviour simulator prediction of MMP is much faster and cheaper than the two laboratory methods previously mentioned and has no laboratory misoperations. Its main disadvantage is that it is a method to predict and not to determine.

The objective of this study is to predict MMP for a reservoir oil - injection gas system through the condensing gas drive process, or to predict slim tube displacement results using a phase behaviour simulator and a new algorithm which converges rapidly towards MMP.

CONDENSING GAS DRIVE MECHANISM

Condensing gas drive is the stepping procedure, previously mentioned, where the equilibrium oil joins injection gas to create new equilibrium oil and gas at constant pressure and temperature conditions. To illustrate this complicated procedure, pseudoternary diagrams formed. ^{v,vi}

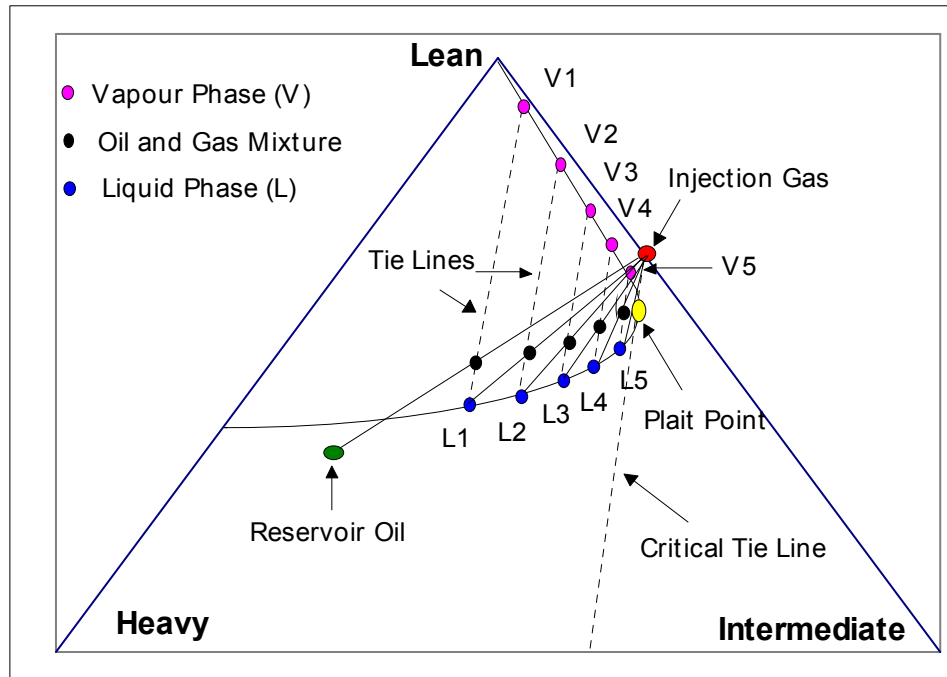
Pseudoternary diagrams are triangular diagrams with one group of components at each of the three corners. A common mode to group oil and gas components into three groups is to divide them into heavy, intermediate and lean components. This kind of grouping often considers Nitrogen, Carbon Dioxide and Methane as lean, Ethane to Hexane Hydrocarbons as intermediate and Hydrocarbons with more than six carbon molecules as heavy.

Figure 1 represents oil and gas position, inside a pseudoternary diagram as well as the condensing gas drive process.

The first contact between reservoir oil and injection gas creates a mixture (M1) which equilibrates to a liquid (L1) and a vapour (V1) phase. Then the liquid phase comes in contact with the injection gas to create a new liquid (L2) and a new vapour (V2) phase. The line which connects liquid (Li) and vapour (Vi) compositions, passes through the mixture composition (Mi) and is called *Tie Line*. This procedure continues until the tie line passes through the *Plait or critical Point*. This final tie line is called *Critical Tie Line* and shows whether the specific reservoir oil can be miscibly displaced by the specific injection gas.

Miscible displacement occurs when reservoir oil composition lies on the opposite side of critical tie line than the injection gas composition. If the critical tie line passes through injection gas composition then the experiment pressure is the minimum miscible

Figure 1.
Pseudoternary Representation of Condensing Gas Drive Process



MINIMUM MISCIBILITY PRESSURE PREDICTION

At first in order to predict MMP a phase behaviour simulator, based on Equation Of State (EOS) must be selected. Two EOS are mainly used for this purpose, Peng - Robinson EOS with or without new mixing rules ^{vii,viii,ix}, and Redlich - Kwong EOS ^x. In this study the Peng - Robinson EOS has been selected to predict the phase behaviour of the mixtures. The optimum initial estimates of the independent variables, which are necessary in order to solve accurately the equilibrium problem, are computed using Varotsis^{xi} method. According to this method EOS involves, before iterations starts, to calculate the initial K-Values and then Broyden's modification of Newton stepping procedure takes place to converge fast towards the solution.

Then a stepping procedure starts, with test temperature always been equal to the reservoir temperature. Test pressure is at first little higher than the reservoir oil saturation pressure, at which reservoir oil composition (90 % mole) mixes with injection gas (10 % mole) giving a mixture preferably inside the two phase region. If the mixture is monophasic new mixtures richer in gas are formed until one of them becomes diphasic. The criterion that shows whether a mixture is monophasic or diphasic is the mixture's saturation pressure. If the mixture's saturation pressure is greater than the test pressure then the mixture is probably inside the two phase region and it flashes to give new equilibrium oil composition and new equilibrium gas composition.

Then equilibrium oil composition (90 % mole) and injection gas (10 % mole) composition creates a new mixture which is most of the times inside two - phase region and a new flash occurs. This procedure stops when the component's K-Values are equal between two sequential flashes, or when a trivial solution occurs due to flashing the mixture outside its two - phase region (Unsuccessful flash). K-Values coming out of a successful flash calculation are the optimum initial estimates for the next flash calculation. The test pressure increases when component's K-Values are equal between two sequential flashes and the new mixture for flash calculation is composed by the latest equilibrium liquid and the injection gas. When a new two - phase mixture forms the previous process starts once more and the initial K-Values are the previous flash calculation K-Values. The test pressure decreases when a trivial solution is obtained and when that happens the pressure increasing / decreasing step takes half its previous value. The entire procedure stops after a few increasing / decreasing steps when the step has been satisfactorily small.

Figure 2 shows the MMP Prediction Flow Chart.

This method of prediction has two main advantages in comparison to others^{xii} :

1) The path to the critical point comes through the two - phase region where K-Values and their initial estimates are good enough to offer accurate convergence, without trivial solution problems usually present at near critical and monophasic region and 2) after each pressure increase the new mixture is made of equilibrium oil and injection gas and not reservoir oil and injection gas, which leads to significant reduction of total flash number (about 1/4) and computer run time (about 1/2).

METHOD RESULTS AND ACCURACY

The method has been tested with published and unpublished data coming from laboratory or computer calculated results. Table 1. shows reservoir oil and injection gas compositions, and Table 2. shows reservoir pressure - temperature and oil properties^{xiii}.

Figures 3 & 4 illustrate pseudoternary representations of MMP prediction method for reservoir oil and injection gas of Table 1, at two different temperatures. Table 3 shows the results of this method compared with the laboratory and Correlation published data.¹³

Table 1.

COMPONENT	RESERVOIR FLUID	INJECTION GAS
N ₂	0.130	0.260
CO ₂	0.390	0.450
H ₂ S	0.000	0.000
C ₁	32.520	52.880
C ₂	5.530	19.430
C ₃	4.250	13.110
I-C ₄	0.850	3.020
N-C ₄	2.910	4.680
I-C ₅	2.280	1.660
N-C ₅	1.390	1.510
C ₆	5.970	3.000
C ₇₊	43.780	0.000

Table 2.

TESTING TEMPERATURE = 170,206 F
SATURATION PRESSURE = 1875 PSIA
C ₇₊ MW = 215.0
C ₇₊ SPECIFIC GRAVITY = 0.8506 gr/ml

Table 3.

	MMP DETERMINED ¹³ (PSIA)	MMP PREDICTED ¹³ (PSIA)	% ERROR	MMP PREDICTED BY THIS STUDY (PSIA)	% ERROR
170 F	2400.00	2268.00	-5.50	2545.90	6.07
206 F	2680.00	2638.00	-1.80	2665.40	-0.06
			Avg 3.65		Avg 3.07

Figure 2.
MMP prediction flow chart

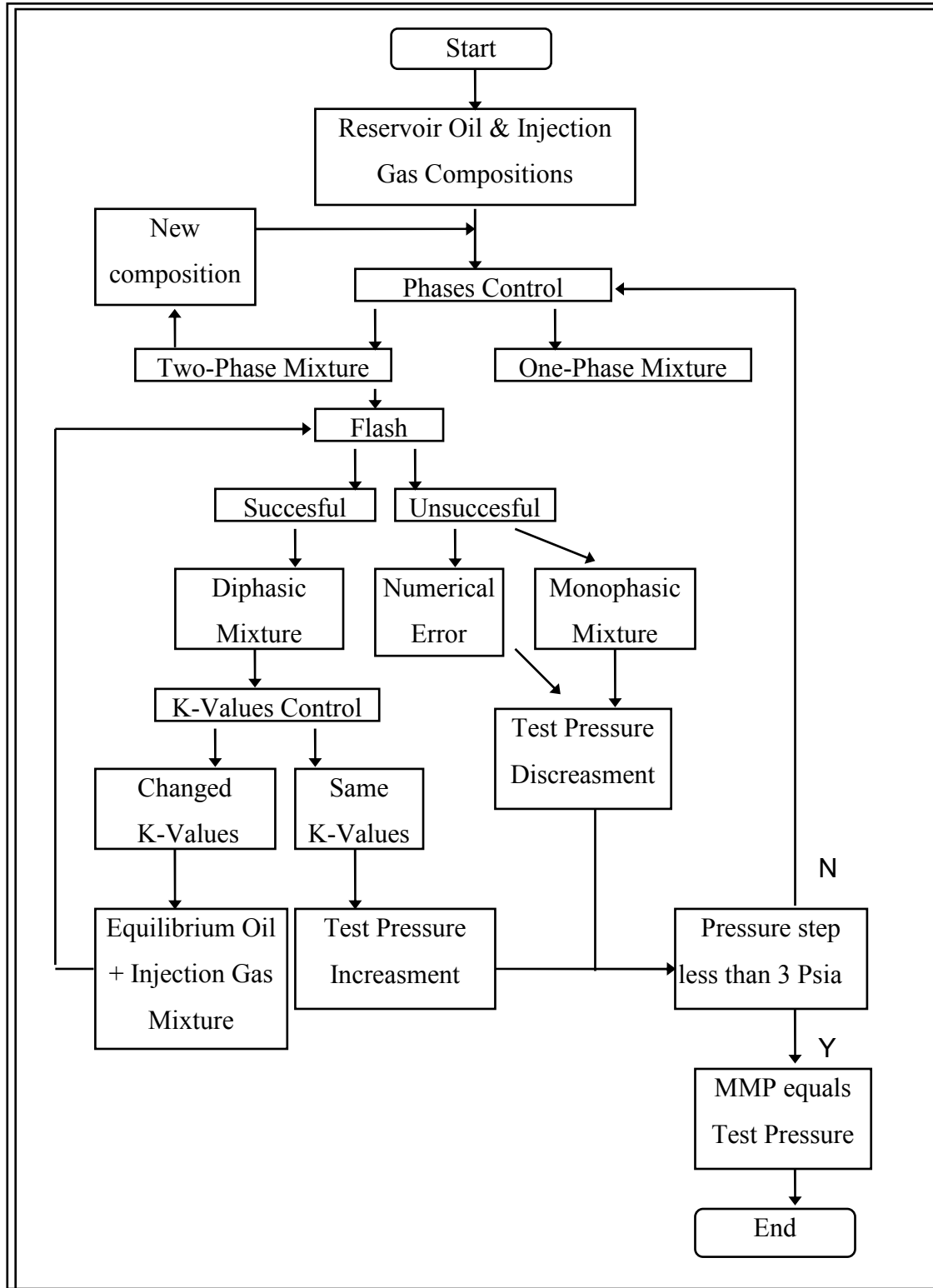


Figure 3
Pseudoternary representation of MMP prediction method

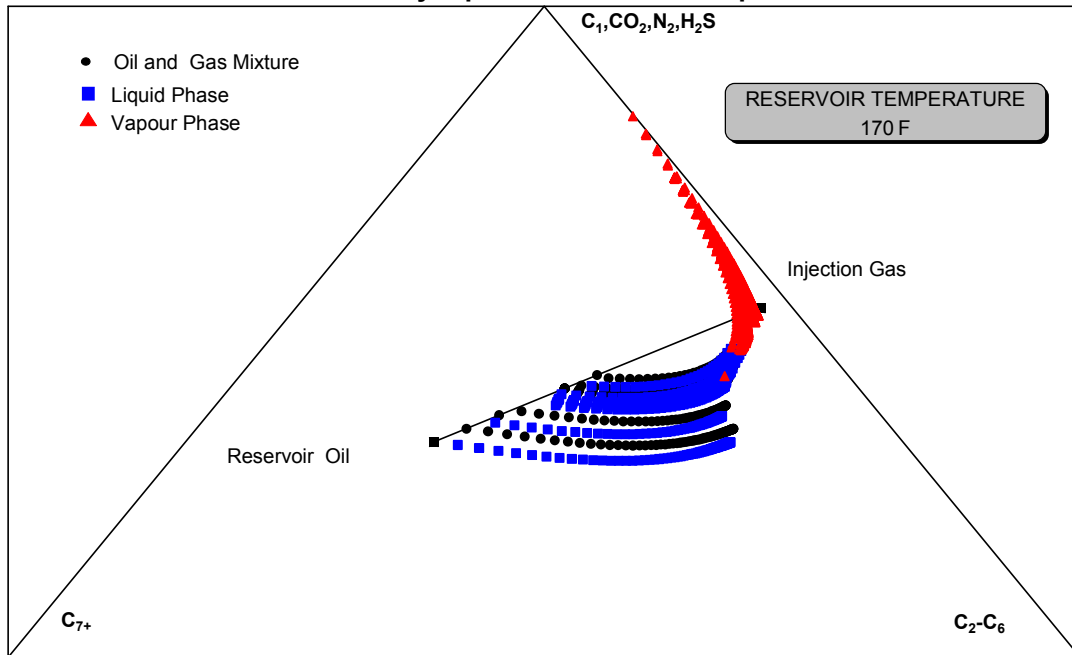
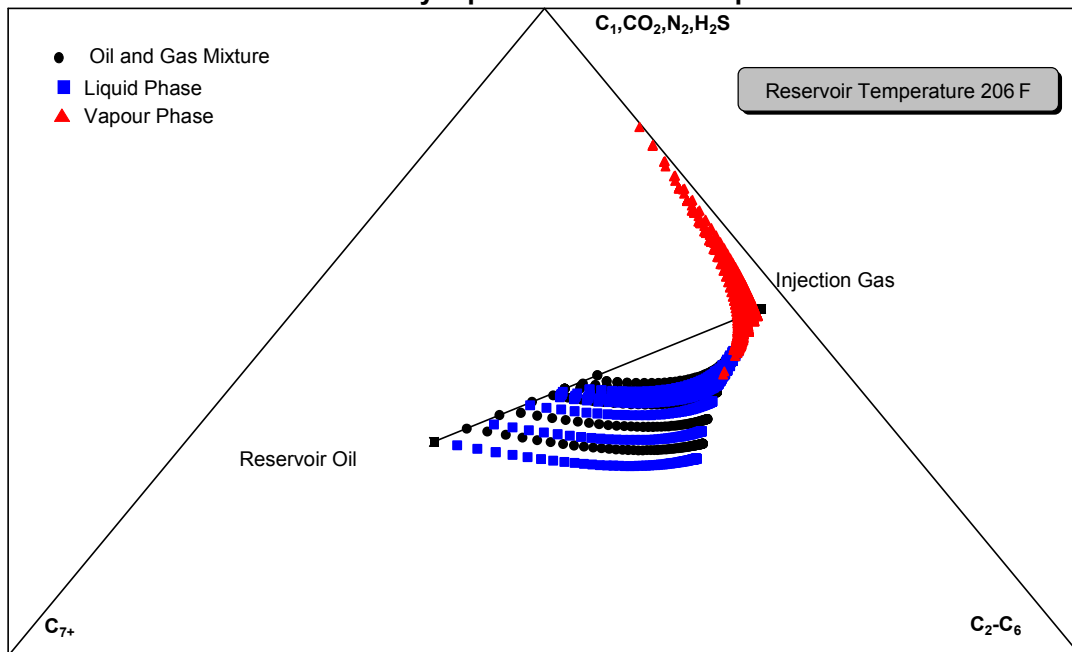


Figure 4
Pseudoternary representation of MMP prediction method



As shown in table 3 the MMP predictions of this method are very close to the MMP values determined by slim-tube displacement with an average error less than that the one resulting from the other prediction method.¹³

This method has also been tested with Middle East Oils and Gases whose compositions and properties are shown in tables 4 & 5.

Table 4.

COMPONENT	RESERVOIR FLUID	INJECTION GAS-1	INJECTION GAS-2	90%GAS-1 10%GAS-2	80%GAS-1 20%GAS-2	70%GAS-1 30%GAS-2
N ₂	0.300	0.570	0.000	0.513	0.456	0.399
CO ₂	2.190	4.620	70.000	11.158	17.696	24.234
H ₂ S	0.110	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
C ₁	50.450	74.840	0.000	67.356	59.872	52.388
C ₂	8.650	10.240	0.000	9.216	8.192	7.168
C ₃	4.940	5.690	30.000	8.121	10.552	12.983
I-C ₄	1.180	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
N-C ₄	2.340	3.010	0.000	2.709	2.408	2.107
I-C ₅	1.110	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
N-C ₅	1.280	0.680	0.000	0.612	0.544	0.476
C ₆	2.290	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
C ₇₊	25.160	0.350	0.000	0.315	0.280	0.245
MMP PREDICTED (PSIA)		5201.00		4891.30	4606.00	4389.80

Table 5.

RESERVOIR TEMPERATURE = 280 F
RESERVOIR PRESSURE = 4565 PSIA
SATURATION PRESSURE = 4247 PSIA
C ₇₊ MOLECULAR WEIGHT = 175.6
C ₇₊ SPECIFIC GRAVITY= 0.811 gr/ml

The MMP predicted (5201 PSIA) for Reservoir Oil - Injection Gas-1 System was close to the laboratory determined (5100 PSIA), about 2. % error.

The reservoir oil also tested with other mixtures as shown in Table 4., in order to find a mixture that can miscibly displace oil in reservoir conditions. That was mixture 3 (70% Gas-1 + 30% Gas-2) where MMP (4389.8 PSIA) is under reservoir pressure. The pseudoternary representations of the procedure for Gas-1 and Mixture-3 are shown in Figures 5 & 6.

Figure 5.
Pseudoternary representation of MMP prediction method

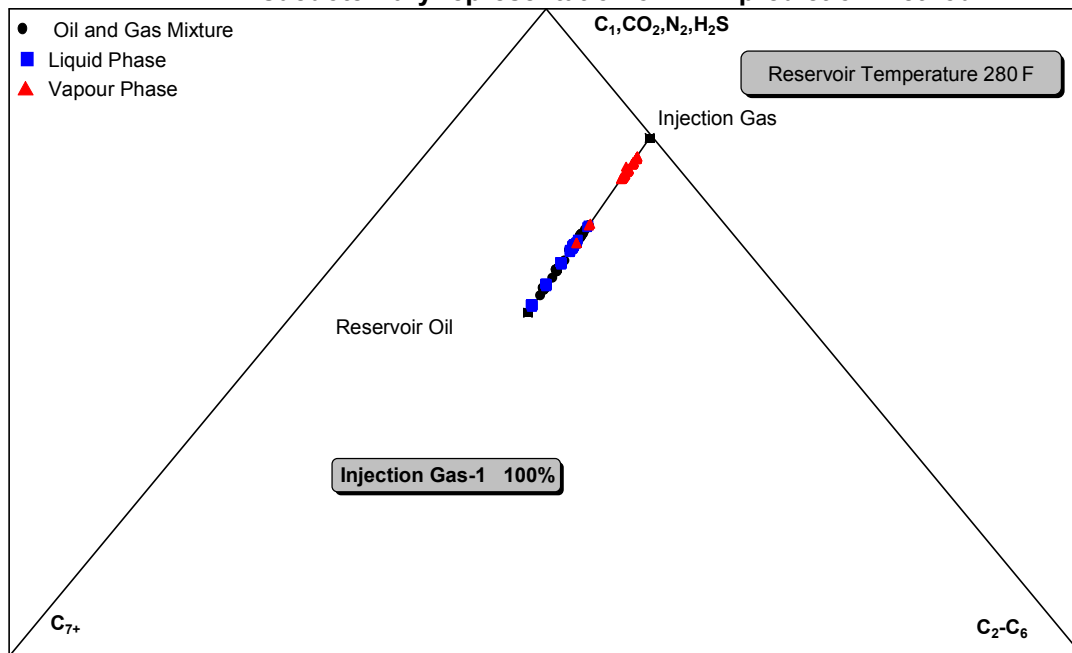
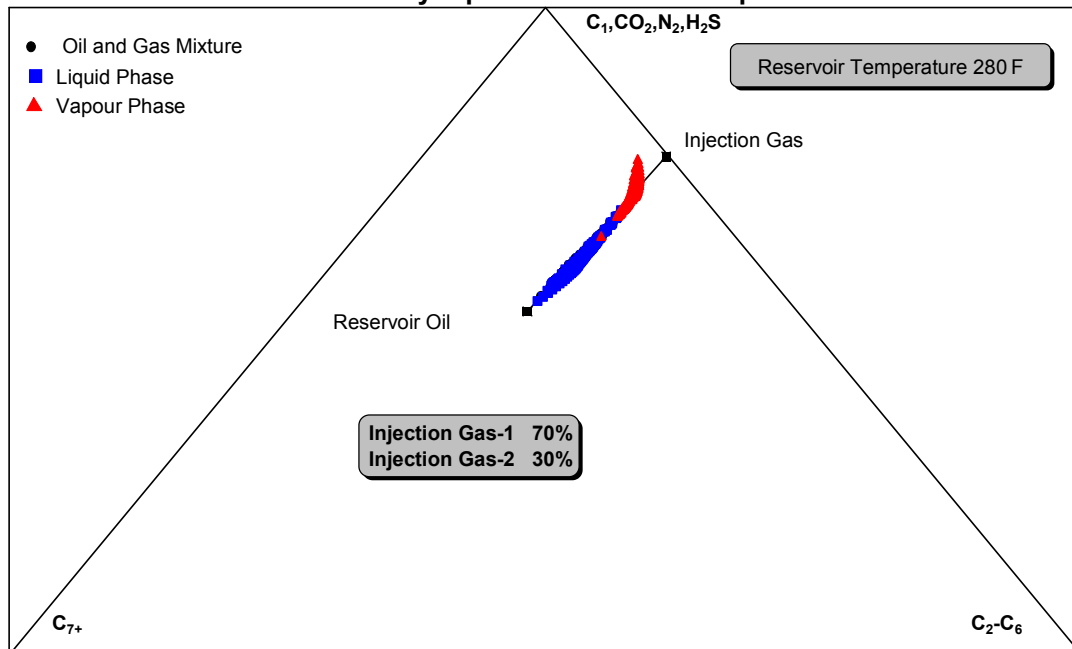


Figure 6.
Pseudoternary representation of MMP prediction method



REFERENCES

- ¹ Benham A. L., Dowden, W. E., & Kunzman, W. J.: "Miscible Fluid Displacement -Prediction of Miscibility" , Trans. AIME (1960), Vol 219, 229 - 235.
- ² Stalkup, F. I., Jr.: Miscible Displacement, Henry L. Doherty Series Monograph, Vol. 8, Society of Petroleum Engineers of AIME, New York (1983)
- ³ Yellig, W. F., and Metcalfe, R. S., "Determination and prediction of CO₂ Minimum Miscibility Pressures" , J. Pet. Tech. (Jan 1980) 160-168
- ⁴ Mansoori, J., Haag, L. G., Bergman, F. D., : "..... Study of Miscibility Relationship and Displacement Behaviour for a Rich-Gas / Crude-Oil System" , SPE Reservoir Engineering, August 1993
- ⁵ Hutchinson, C. A., Braun, P. H. : " Phase Relations of Miscible Displacement in Oil Recovery" , AIChE J. (1961) 7, 64-72
- ⁶ Clark, N. J., Schulz, W. P., Shearin, H. M., : " Condensing Gas Drive, Critical Displacement Process -- New Injection Method Affords Total Oil Recovery, " Pet. Eng. (Oct., 1956) 28, B-45
- ⁷ Enick, R. M., Holder, G. D., Mohamed, R. S., : " Four - Phase Flash Equilibrium calculations Using Peng - Robinson EOS and a Mixing Rule for Asymmetric Systems" , 60th Annual Technical Conference and Exhibition of the SPE, Las Vegas, September 22 -25, 1985
- ⁸ Kuan, D. Y., : " Multicomponent Carbon Dioxide / Water / Hydrocarbon Phase Behavior Modeling: A Comparative Study, " SPERE (Jan 1986), 61-72
- ⁹ Conrard, G. P., Gravier F. J., : " Peng -Robinson EOS Checks Validity of PVT experiments" , Oil & Gas Journal, Apr. 21, 1980, 77 -86
- ¹⁰ Fussell, D. D., Yanosik, J. L., : " An Iterative Sequence for Phase Equilibria Calculations incorporating the Redlich - Kwong EOS" , SPE Journal, (June, 1978) 173 -182
- ¹¹ Varotsis, N., : " A Robust Prediction Method for Rapid- Phase Behavior Calculations" , SPERE, May 1989, 237 - 243
- ¹² Turek, E. A., Luks, K. D., Baker, L. E., : " Calculation of Minimum Miscibility Pressure, " 5th Symposium on Enhance Oil Recovery of SPE and the Department of Energy, Tulsa, April 20-23, 1986
- ¹³ Kuo, S. S., : " Prediction of Miscibility for The Enriched-Gas Drive Process" , 60th Annual Technical Conference and Exhibition of the SPE, Las Vegas, September 22 -25, 1985

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το πετρέλαιο που έχει παραμείνει στον ταμιευτήρα μετά την πρωτογενή και δευτερογενή παραγωγή μπορεί να ανακτηθεί με την εφαρμογή της μεθόδου μετατόπισης με ανάμιξη. Εισαγωγή στον ταμιευτήρα ρευστού το οποίο έχει την δυνατότητα να αναμιχθεί με το πετρέλαιο στις συνθήκες του ταμιευτήρα έχει σαν αποτέλεσμα την ολική (θεωρητικά) ανάκτηση του πετρελαίου.

Στην παρούσα εργασία κατασκευάστηκε πρόγραμμα με τίτλο MMP σε γλώσσα υπολογιστή FORTRAN77 με το οποίο προσδιορίζεται η ελάχιστη πίεση που απαιτείται για την ανάμιξη του πετρελαίου του ταμιευτήρα με το ρευστό εισπίεσης με την διαδικασία της ανάμιξης με συμπύκνωση (Condensing Gas Drive).

Οι δοκιμές που εκτελέστηκαν από το πρόγραμμα MMP αφορούν πραγματικές περιπτώσεις ταμιευτήρων προερχόμενες από την Ελληνική και τη διεθνή πετρελαϊκή βιομηχανία.

Τα αποτελέσματα του προγράμματος MMP έχουν συγκριθεί με αποτελέσματα από άλλη υπολογιστική μέθοδο και με αποτελέσματα από εργαστηριακές μελέτες.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ABSTRACT	i
SUMMARY	i
INTRODUCTION.....	ii
CONDENSING GAS DRIVE MECHANISM.....	iii
MINIMUM MISCIBILITY PRESSURE PREDICTION.....	iv
METHOD RESULTS AND ACCURACY.....	v
REFERENCES.....	xi
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	xii
ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ.....	A
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
2. ΕΚΤΟΠΙΣΗ ΤΟΥ ΡΕΥΣΤΟΥ ΤΟΥ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΑ ΑΠΟ	
ΑΝΑΜΙΞΙΜΟ ΡΕΥΣΤΟ	3
2.1 Ψευδοτριαδικό διάγραμμα	4
3. ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΚΤΟΠΙΣΗΣ ΜΕ ΑΝΑΜΙΞΗ.....	8
3.1 Ανάμιξη πρώτης επαφής (First Contact Miscibility)	8
3.2 Ανάμιξη με μηχανισμό εξάτμισης (Vaporizing - Gas Drive).....	9
3.3 Ανάμιξη με χρήση CO ₂ ως ρευστό εισπίεσης.....	12
3.4 Ανάμιξη με μηχανισμό συμπύκνωσης (Condensing - Gas Drive)	12
4. ΠΡΟΕΛΕΥΣΗ ΤΩΝ ΡΕΥΣΤΩΝ ΕΙΣΠΙΕΣΗΣ	17
4.1 Ρευστά εισπίεσης για ανάμιξη πρώτης επαφής.....	17
4.2 Ρευστά εισπίεσης για ανάμιξη με μηχανισμό εξάτμισης.....	17
4.3 Προέλευση CO ₂ για ανάμιξη με πετρέλαιο.....	19
4.4 Ρευστά εισπίεσης για ανάμιξη με μηχανισμό συμπύκνωσης	21
5. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΑΝΑΜΙΞΗΣ	22
5.1 Ανάμιξη πρώτης επαφής	22
5.2 Ανάμιξη με μηχανισμό εξάτμισης.....	24
5.3 Ανάμιξη με CO ₂ ως ρευστό εισπίεσης.....	25
5.4 Ανάμιξη με μηχανισμό συμπύκνωσης	29
6. ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΠΡΟΒΛΕΨΗ ΤΗΣ ΕΛΑΧΙΣΤΗΣ ΠΙΕΣΗΣ	
ΑΝΑΜΙΞΗΣ (MINIMUM MISCIBILITY PRESSURE)	31
6.1 6.1 Εργαστηριακές δοκιμές εκτόπισης σε λεπτό σωλήνα (slim tube displacement).....	32
6.2 Εργαστηριακή προσομοίωση της διαδικασίας ανάμιξης με χρήση κελιού PVT με παράθυρο (PVT windowed-cell)	36
6.3 Μαθηματική προσομοίωση της ισορροπίας των φάσεων με χρήση καταστατικών εξισώσεων και συντελεστών ισορροπίας	37
7. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΕΛΑΧΙΣΤΗΣ ΠΙΕΣΗΣ ΑΝΑΜΙΞΗΣ ΜΕ ΤΟ	
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ MMP	40
7.1 Υπορουτίνα FWRITE	47
7.2 Υπορουτίνα APICON1	47
7.3 Υπορουτίνα MIXGASOIL.....	48
7.4 Υπορουτίνα MIXDIPHASIC	48
7.5 Υπορουτίνα ESTIMATION.....	49
7.6 Υπορουτίνα DPRE1.....	49
7.7 Υπορουτίνα CHANGEOIL	49

7.8	Υπορουτίνα STARTOIL	49
7.9	Υπορουτίνα TRIVTEST	50
7.10	Υπορουτίνα KVALPRE	50
8.	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ.....	52
8.1	Σύστημα ανάμιξης ρευστών από δημοσιευμένη εργασία.....	52
8.2	Σύστημα ανάμιξης ρευστών από την πετρελαϊκή βιομηχανία (Μέση Ανατολή #1).....	58
8.3	Σύστημα ανάμιξης ρευστών από την πετρελαϊκή βιομηχανία (Μέση Ανατολή #2).....	67
8.4	Σύστημα ανάμιξης ρευστών από την Ελληνική πετρελαϊκή βιομηχανία...	71
9.	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	79
10.	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	82
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α.....	85
	ΥΠΟΡΟΥΤΙΝΑ DPRE1.....	85
	ΥΠΟΡΟΥΤΙΝΑ KVALPRE	86
	ΥΠΟΡΟΥΤΙΝΑ TRIVTEST	86
	ΥΠΟΡΟΥΤΙΝΑ READF	87
	ΥΠΟΡΟΥΤΙΝΑ WRITEF	89
	ΥΠΟΡΟΥΤΙΝΑ MIXGASOIL.....	91
	ΥΠΟΡΟΥΤΙΝΑ FWRITE.....	94
	ΥΠΟΡΟΥΤΙΝΑ MIXDIPHASIC	96
	ΥΠΟΡΟΥΤΙΝΑ CHANGEOIL.....	97
	ΥΠΟΡΟΥΤΙΝΑ STARTOIL	98
	ΥΠΟΡΟΥΤΙΝΑ ESTIMATION.....	101
	ΥΠΟΡΟΥΤΙΝΑ APICON1	101
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β.....	103
	MISC3 MACRO	103
	KVAL1 MACRO.....	110

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Μετά το αρχικό στάδιο στο οποίο γίνεται η εγκατάσταση του εξοπλισμού το κοίτασμα του πετρελαίου μπαίνει σε παραγωγή. Η πρώτη φάση της παραγωγής ονομάζεται πρωτογενής, και το πετρέλαιο παράγεται λόγω της δράσης φυσικών μηχανισμών. Οι μηχανισμοί που ενεργούν σε αυτό το στάδιο είναι, η εκτόνωση της υγρής φάσης, η μείωση του όγκου των πόρων, η εκτόνωση του όγκου του νερού αν υπάρχει υδροφόρος κάτω από τον ταμιευτήρα πετρελαίου, η εισχώρηση νερού από πιθανούς γειτονικούς ταμιευτήρες νερού, η εκτόνωση του αερίου αν υπάρχει υπερκείμενη ζώνη αερίου καθώς και η εκτόνωση του αερίου εν διαλύσει που δημιουργείται όταν η πίεση του ταμιευτήρα γίνει μικρότερη από το σημείο βρασμού του πετρελαίου.

Στα πρώτα χρόνια παραγωγής του πετρελαίου, περίπου μέχρι το 1930, η εκμετάλλευση των κοιτασμάτων γινόταν αποκλειστικά με τους μηχανισμούς της πρωτογενούς παραγωγής. Η παραγωγή σταματούσε όταν η πίεση του ταμιευτήρα έπεφτε πολύ χαμηλά ή όταν ο λόγος παραγωγής νερού προς πετρέλαιο ήταν τόσο μεγάλος ώστε το κόστος παραγωγής ήταν μεγαλύτερο από το κέρδος. Η ικανότητα αποληψιμότητας διέφερε από ταμιευτήρα σε ταμιευτήρα και συνήθως ήταν της τάξης του 5 με 20% του συνολικού όγκου των υδρογονανθράκων.

Κατόπιν, η εισπίεση ρευστών (αερίου ή νερού) στον ταμιευτήρα για την διατήρηση της πίεσης του, υιοθετήθηκε σαν μια μέθοδος που αυξάνει την αποληψιμότητα των υδρογονανθράκων. Η έκχυση νερού γίνεται στον υδροφόρο ορίζοντα κοντά στην διεπιφάνεια νερού - πετρελαίου ενώ η έκχυση του αερίου γίνεται στο χώρο του υπερκείμενου αερίου. Και στις δύο περιπτώσεις υπάρχει διατήρηση της πίεσης ή επιβράδυνση της πτώσης της στον ταμιευτήρα άρα και σταθεροί ρυθμοί παραγωγής για μεγαλύτερο διάστημα. Αργότερα εκτιμήθηκε ότι το εισπιεζόμενο ρευστό μετακινούσε μέρος του πετρελαίου από το πέτρωμα προς τα πηγάδια παραγωγής.

Σήμερα η εισπίεση ρευστών που ακολουθεί μια μικρή ή μεγάλη περίοδο πρωτογενούς παραγωγής ονομάζεται δευτερογενής παραγωγή και ο συνδυασμός πρωτογενούς και δευτερογενούς παραγωγής έχει οδηγήσει στην εκταμίευση μεγαλύτερου μέρους πετρελαίου που κατά μέσο όρο κυμαίνεται από 20 έως 40% του συνολικού όγκου του πετρελαίου στον ταμιευτήρα.

Η εισπίεση ενός ρευστού στον ταμιευτήρα μπορεί να φέρει ακόμα καλύτερα αποτελέσματα εκτόπισης όταν αυτό μπορεί να αναμιχθεί με το ρευστό του ταμιευτήρα.

Σε αυτή την περίπτωση δεν δημιουργούνται διεπιφάνειες μεταξύ των ρευστών και η εκτόπιση μπορεί να είναι ολική.

Το ρευστό έκχυσης μπορεί να είναι αναμίξιμο με το πετρέλαιο του ταμιευτήρα σε όλες τις αναλογίες οπότε πρόκειται για μηχανισμό ανάμιξης πρώτης επαφής (first contact miscibility) ή να δημιουργείται μία ζώνη μετάβασης μεταξύ των δύο ρευστών. Μέσα στον ταμιευτήρα υπάρχει διαρκής μεταφορά μάζας από το ρευστό ταμιευτήρα προς τη μεταβατική ζώνη και αντίστροφα καθώς και από το ρευστό εισπίεσης προς τη μεταβατική ζώνη και αντίστροφα, που έχει σαν αποτέλεσμα την εκτόπιση του πετρελαίου από το αναμίξιμο ρευστό. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται ανάμιξη πολλαπλών επαφών (multiple contact miscibility) ή δυναμική (dynamic miscibility). Στις δύο αυτές περιπτώσεις η αποληψιμότητα του ρευστού του ταμιευτήρα μπορεί να φτάσει θεωρητικά ακόμα και στο 100%.

2. ΕΚΤΟΠΙΣΗ ΤΟΥ ΡΕΥΣΤΟΥ ΤΟΥ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΑ ΑΠΟ ΑΝΑΜΙΞΙΜΟ ΡΕΥΣΤΟ

Η εισπίεση ρευστών για την εκτόπιση με ανάμιξη του πετρελαίου, είναι μια πολλά υποσχόμενη μέθοδος, η οποία όμως δεν είναι ευρέως διαδεδομένη όπως η εισπίεση νερού, διότι δεν μπορεί να εφαρμοστεί σε πολλά είδη ταμιευτήρων.

Σημαντικοί παράγοντες που επηρεάζουν την εφαρμογή της μεθόδου είναι η τιμή της πίεσης του ταμιευτήρα, η σύσταση του πετρελαίου, καθώς και το κόστος εφαρμογής της μεθόδου. Τα ρευστά εισπίεσης που χρησιμοποιούνται είναι το άζωτο, το φυσικό αέριο, τα καυσαέρια (flue gas) και το διοξείδιο του άνθρακα (CO_2).

Το κόστος εφαρμογής της μεθόδου είναι μεγάλο λόγω της υψηλής τιμής του εισπιεζόμενου ρευστού, του ακριβού εξοπλισμού και του υψηλού κόστους λειτουργίας και συντήρησης των εγκαταστάσεων. Το μεγαλύτερο μέρος των εξόδων, για την εφαρμογή της μεθόδου, γίνεται στα αρχικά στάδια της εκμετάλλευσης ενώ τα κέρδη έρχονται αρκετά αργότερα, περίπου στη μέση του συνολικού χρόνου του προγράμματος. Τα αποθέματα και η μεταφορά του ρευστού εισπίεσης είναι επίσης ουσιαστικά προβλήματα. Το κόστος εφαρμογής θα πρέπει να συγκριθεί με αυτό άλλων μεθόδων, πιθανόν και με το ενδεχόμενο της εγκατάλειψης του κοιτάσματος.

Οι συνθήκες που επιτρέπουν την οικονομική εκμετάλλευση κοιτάσματος πετρελαίου με την μέθοδο εκτόπισης με ανάμιξη είναι οι εξής:

- 1) Ύπαρξη ικανής και φθηνής ποσότητας ρευστού εισπίεσης σε όγκο και ρυθμό παράδοσης απαραίτητο για την διαδικασία.
- 2) Η πίεση του ταμιευτήρα πρέπει να είναι μεγαλύτερη ή ίση από αυτήν που απαιτείται για την ανάμιξη των ρευστών.
- 3) Η επιπλέον ποσότητα πετρελαίου που θα παραχθεί πρέπει να είναι αρκετή ώστε να υπερκαλύψει το υψηλότερο κόστος της μεθόδου.

Η χρήση του CO_2 ως εισπιεζόμενο ρευστό για την επίτευξη εκτόπισης του πετρελαίου με ανάμιξη είναι ενθαρρυντική. Το CO_2 παρουσιάζει χαμηλό ιξώδες και πυκνότητα παρόμοια με του πετρελαίου σε αρκετούς ταμιευτήρες, ενώ η πίεση που απαιτείται για την ανάμιξή του με τα ρευστά από διάφορους ταμιευτήρες είναι μικρότερη σε σχέση με αυτή που απαιτείται όταν ως ρευστά εισπίεσης χρησιμοποιούνται άλλα αέρια (N_2 , CH_4). Οι παραπάνω παράγοντες καθώς και το ότι υπάρχουν τεράστιες

ποσότητες CO_2 προερχόμενες από φυσικές πηγές ή από την βιομηχανία ως παραπροϊόν δίνουν προβάδισμα στο CO_2 για την χρήση του ως ρευστό ανάμιξης.

2.1 Ψευδοτριαδικό διάγραμμα

Η απεικόνιση της ισορροπίας των φάσεων πετρελαϊκών ρευστών για την περίπτωση της εκτόπισης με ανάμιξη, γίνεται με την χρήση ψευδοτριαδικών διαγραμμάτων. Η απεικόνιση γίνεται αφού πρώτα τα συστατικά των ρευστών ομαδοποιηθούν σε 3 κατηγορίες ή 3 ψευδοσυστατικά.

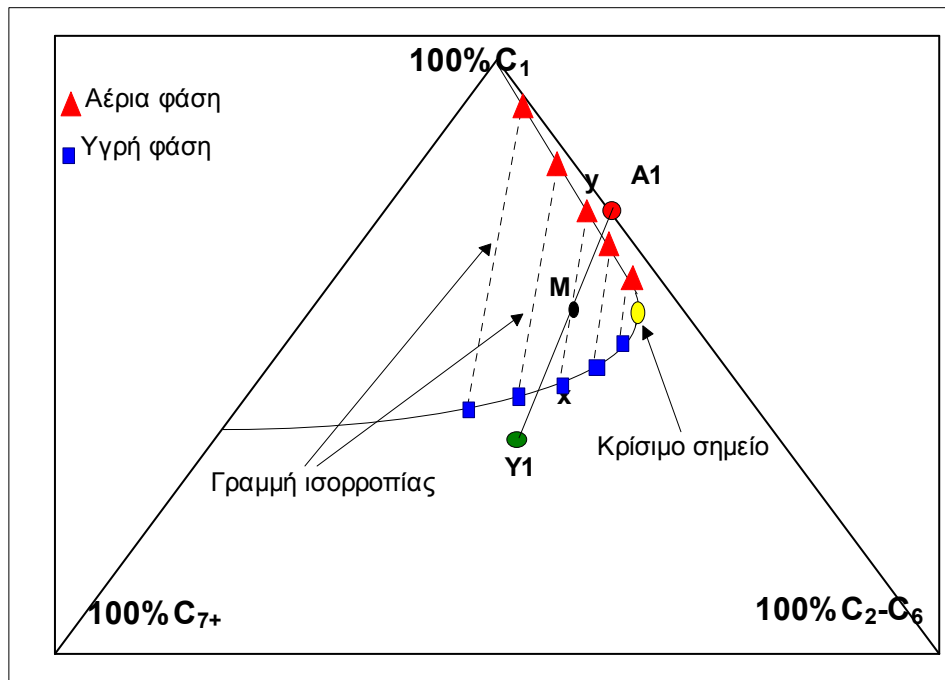
Μια συνήθης ομαδοποίηση είναι:

- 1) Ελαφρύ συστατικό που αποτελείται από N_2 και CH_4 .
- 2) Ενδιάμεσο ψευδοσυστατικό, όπου περιλαμβάνονται υδρογονάνθρακες από αιθάνιο έως εξάνιο.
- 3) Βαρύ ψευδοσυστατικό στο οποίο περιλαμβάνονται οι υδρογονάνθρακες με 7 άτομα άνθρακα και περισσότερα.

Η απεικόνιση αυτή δεν είναι ακριβής αλλά είναι γρήγορη και απλή στην ανάλυση.

Κάθε γωνία του διαγράμματος αντιπροσωπεύει το 100% του συστατικού (ψευδοσυστατικού), ενώ η αντίθετη πλευρά το 0% του ίδιου συστατικού. Με τον τρόπο αυτό, ένα σημείο μέσα στο τρίγωνο αντιπροσωπεύει την σύσταση του ρευστού. Στο ίδιο διάγραμμα μπορεί να φανεί και η ισορροπία των φάσεων.

Όπως φαίνεται στο σχήμα 2.1 αν η σύσταση του μίγματος αντιπροσωπεύεται από το σημείο **M**, το οποίο προκύπτει από την ανάμιξη του πετρελαίου με σύσταση **Y1** με το ρευστό εισπίεσης σύστασης **A1**, τότε το μίγμα βρίσκεται σε διφασική ισορροπία. Αυτό σημαίνει ότι στην συγκεκριμένη πίεση και θερμοκρασία αν αφεθεί το μίγμα να έρθει σε ισορροπία θα σχηματιστούν δύο φάσεις, μια υγρή με σύσταση **x** και μια αέρια με σύσταση **y**. Η γραμμή που ενώνει τις δύο συστάσεις που βρίσκονται σε ισορροπία ονομάζεται γραμμή ισορροπίας (tie line). Τα δύο ρευστά σε ισορροπία βρίσκονται στα σημεία κορεσμού τους, δηλαδή η υγρή στο σημείο βρασμού και η αέρια στο σημείο δρόσου. Η καμπύλη που ενώνει όλα τα σημεία δρόσου, ενώνεται με αυτή που συνδέει τα σημεία βρασμού, σε ένα χαρακτηριστικό σημείο που ονομάζεται κρίσιμο σημείο (plait - critical point). Στο σημείο αυτό οι συστάσεις και οι ιδιότητες των ρευστών σε ισορροπία γίνονται ίδιες.



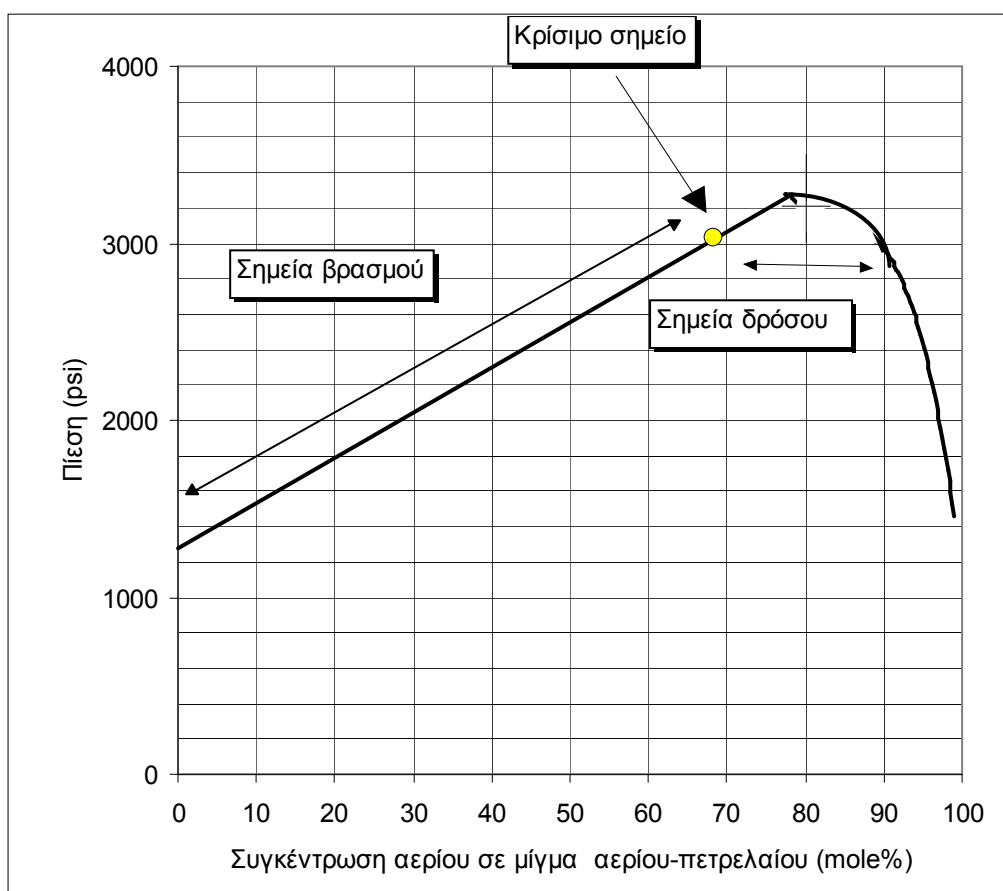
Σχήμα 2.1

Απεικόνιση της ισορροπίας φάσεων σε ψευδοτριαδικό διάγραμμα

Οι δύο αυτές καμπύλες (βρασμού και δρόσου), μαζί με το κρίσιμο σημείο, αποτελούν το όριο μεταξύ μονοφασικής και διφασικής περιοχής. Έτσι κάθε σύσταση που απεικονίζεται εντός των καμπυλών, θα δημιουργεί δύο φάσεις σε ισορροπία, ενώ αντίθετα κάθε σύσταση έξω από τις καμπύλες θα είναι μονοφασική. Η αέρια φάση εμφανίζεται στα δεξιά της καμπύλης δρόσου, ενώ η υγρή εμφανίζεται κάτω από την καμπύλη βρασμού. Η πίεση και η θερμοκρασία καθορίζουν το μέγεθος της διφασικής περιοχής. Αύξηση της πίεσης μειώνει το μέγεθος της διφασικής περιοχής, ενώ αύξηση της θερμοκρασίας το αυξάνει. Επίσης, στα ψευδοτριαδικά διαγράμματα, τα μίγματα μεταξύ δύο συστατικών, σε οποιαδήποτε αναλογία απεικονίζονται πάνω στην ευθεία που τα ενώνει. Αν και η απεικόνιση με ψευδοσυστατικά δεν είναι πολύ ακριβής είναι πολύ χρήσιμη για την κατανόηση της διαδικασίας ανάμιξης.

Για την απεικόνιση της ισορροπίας φάσεων, χρησιμοποιούνται επίσης διαγράμματα P-X (πίεση-ποσοστό ρευστών εισπίεσης στο συνολικό ρευστό mole %) ή P-T (πίεση-θερμοκρασία). Τα διαγράμματα P-X δημιουργούνται μετά από παρατηρήσεις σε οπτικό κελίο υψηλής πίεσης. Στο ρευστό του ταμιευτήρα που βρίσκεται μέσα στο κελί προστίθεται ρευστό εισπίεσης και προσδιορίζονται τα σημεία κορεσμού του μίγματος. Η

διαδικασία επαναλαμβάνεται με την πρόσθεση επιπλέον ποσοτήτων ρευστού εισπίεσης και σχηματίζεται το διάγραμμα.



Σχήμα 2.2

Απεικόνιση της ισορροπίας φάσεων διάγραμμα πίεσης-συγκέντρωσης

Η απεικόνιση του φαινομένου ανάμιξης από παρατηρήσεις σε οπτικά κελία, είναι λιγότερο πολύπλοκη και αρκετά πιο γρήγορη από την απεικόνιση μέσω ψευδοτριαδικών διαγραμμάτων, διότι τα αποτελέσματά της σε σχέση με τα αποτελέσματα των ψευδοτριαδικών διαγραμμάτων προκύπτουν εύκολα μέσω απλής οπτικής παρατήρησης. Εντούτοις με αυτά τα διαγράμματα μελετούνται μόνο οι συστάσεις που προκύπτουν από μίξη του ρευστού του ταμιευτήρα με το ρευστό εισπίεσης και όχι όλα τα μίγματα που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την επίτευξη της αναμιξιμότητας.

Στο σχήμα 2.2 φαίνεται το διάγραμμα P-X που προέκυψε από τη μελέτη μιγμάτων μεθανίου με υγρό αποτελούμενο από μεθάνιο (30,8% mole)- βουτάνιο (55,4% mole) - δεκάνιο (13,8% mole)¹.

Τα διαγράμματα P-T είναι επίσης χρήσιμα για την μελέτη της ισορροπίας φάσεων των ρευστών εισπίεσης και ταμιευτήρα. Από την καμπύλη κορεσμού των μιγμάτων φαίνεται τότε αυτά θα είναι μονοφασικά και τότε όχι.

Στο σχήμα 2.3 φαίνονται τα διαγράμματα P-T για μίγματα αιθανίου - επτανίου². Οι καμπύλες AC και BC₇ είναι οι καμπύλες δρόσου του καθαρού αιθανίου και επτανίου αντίστοιχα. Οι καμπύλες A₁B₁C₁, A₂B₂C₂ και A₃B₃C₃ αποτελούν τις καμπύλες βρασμού και δρόσου για διάφορα μίγματα αιθανίου - επτανίου. Για παράδειγμα, η καμπύλη A₃B₃C₃ αποτελείται από τις καμπύλες βρασμού και δρόσου σε διάφορες θερμοκρασίες για μίγμα το οποίο περιέχει αιθάνιο 9.78% mole. Η διακεκομμένη γραμμή αναπαριστά το γεωμετρικό τόπο των κρίσιμων σημείων όλων των μιγμάτων αιθανίου - επτανίου. Μίγματα τα οποία βρίσκονται σε συνθήκες που απεικονίζονται πάνω από αυτή τη γραμμή είναι μονοφασικά ενώ κάτω από αυτή μπορεί τα μίγματα να εμφανισθούν διφασικά ανάλογα με την σύστασή τους.

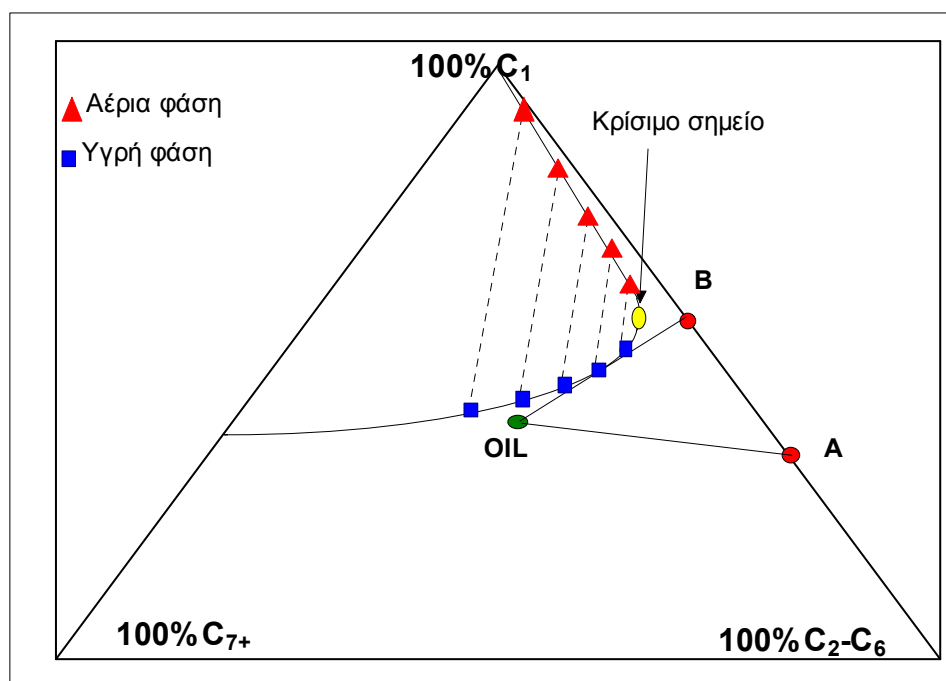
Σχήμα 2.3

Διάγραμμα πίεσης - θερμοκρασίας για μίγματα αιθανίου - επτανίου

3. ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΚΤΟΠΙΣΗΣ ΜΕ ΑΝΑΜΙΞΗ

3.1 Ανάμιξη πρώτης επαφής (First Contact Miscibility)

Ο πιο απλός και πιο άμεσος μηχανισμός για την εκτόπιση του πετρελαίου από ρευστό αναμίξιμο με αυτό είναι ο μηχανισμός ανάμιξης πρώτης επαφής (first contact miscibility) ή απ'ευθείας ανάμιξης. Σύμφωνα με το μηχανισμό αυτό, διοχετεύεται στον ταμιευτήρα ρευστού εισπίεσης, το οποίο έχει την ικανότητα να αναμιγνύεται με το πετρέλαιο σε όλες τις αναλογίες, έτσι ώστε όλα τα μίγματά τους να είναι μονοφασικά. Τα ρευστά εισπίεσης που χρησιμοποιούνται για αυτή τη μέθοδο περιέχουν ενδιάμεσου μοριακού βάρους υδρογονάνθρακες, όπως προπάνιο, βουτάνιο ή υγροποιούμενα πετρελαϊκά αέρια (LPG-Liquifiable Petroleum Gases).



Σχήμα 3.1

Απεικόνιση ανάμιξης πρώτης επαφής (First contact miscibility) σε ψευδοτριαδικό διάγραμμα.

Στο ψευδοτριαδικό διάγραμμα η ανάμιξη πρώτης επαφής εμφανίζεται δυνατή, όταν η ευθεία που ενώνει το σημείο της σύστασης του πετρελαίου που απεικονίζει τη σύσταση του ρευστού εισπίεσης, βρίσκεται έξω από τον χώρο της διφασικής περιοχής των δύο συστάσεων όπως φαίνεται στο σχήμα 3.1.

Όλα τα μίγματα πετρελαίου-ρευστού εισπίεσης βρίσκονται στη μονοφασική περιοχή για την συγκεκριμένη πίεση και θερμοκρασία και μάλιστα το μίγμα θα ήταν μονοφασικό ακόμα και αν το μίγμα αραιωνόταν με μεθάνιο. Η αραιώση θα μπορούσε να φτάσει, κρατώντας μονοφασικό το μίγμα και κατ' επέκταση έχοντας ανάμιξη πρώτης επαφής, μέχρις ότου το σημείο σύστασης του πετρελαίου και το σημείο σύστασης του νέου μίγματος να ενώνονται από μια ευθεία εφαπτόμενη του φακέλου φάσεων. Στο σχήμα 3.1 το ρευστό εισπίεσης με σύσταση **A** είναι απ'ευθείας αναμίξιμο με το πετρέλαιο του ταμιευτήρα **OIL**. Το ίδιο ισχύει και για το ρευστό εισπίεσης με σύσταση **B**, το οποίο προκύπτει από αραιώση του ρευστού **A** με μεθάνιο, η απ'ευθείας ανάμιξη όμως είναι οριακή σε αυτή την περίπτωση όπως φαίνεται από την ευθεία που ενώνει τα **OIL** και **B** η οποία εφάπτεται του φακέλου κορεσμού του συστήματος πετρελαίου-ρευστού εισπίεσης.

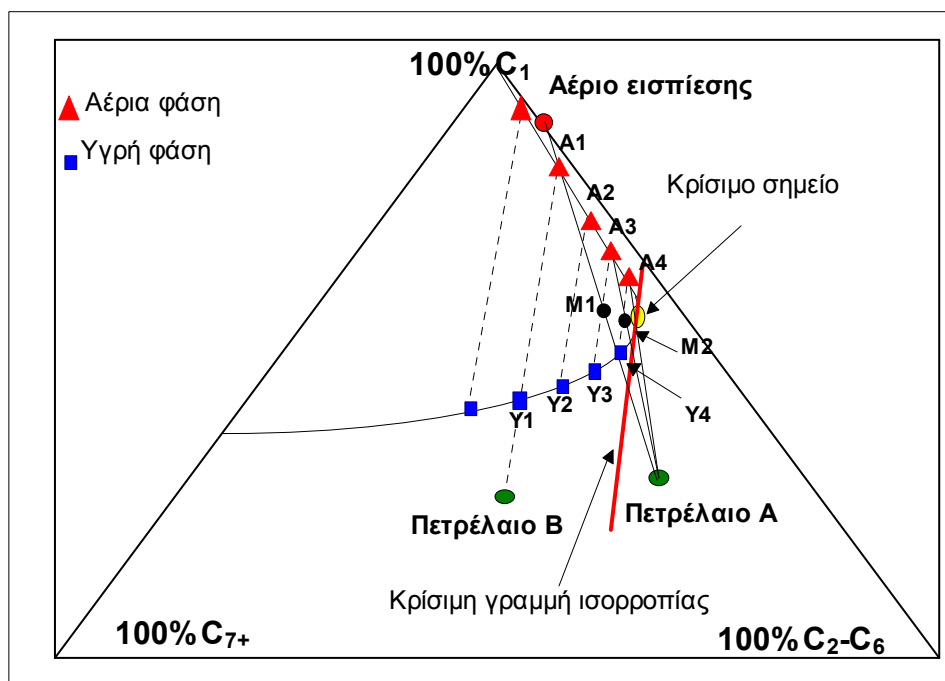
Σε P-X διάγραμμα η πίεση που απαιτείται για εκτόπιση με ανάμιξη πρέπει να είναι μεγαλύτερη από την κρίσιμη πίεση των ρευστών εισπίεσης και ταμιευτήρα (Cricondenbar), εφόσον όλα τα μίγματα πάνω από αυτή την πίεση είναι μονοφασικά. Τα πράγματα περιπλέκονται όταν το μίγμα των ρευστών είναι αέριο στην θερμοκρασία του ταμιευτήρα οπότε η κρίσιμη πίεση θα είναι αρκετά μεγαλύτερη.

Στα ασφατικά πετρέλαια, το ρευστό εισπίεσης που χρησιμοποιείται για ανάμιξη πρώτης επαφής θα πρέπει να έχει την ικανότητα να διαλύει τις ασφατικές ενώσεις, πράγμα που επιτυγχάνεται με την αύξηση του μοριακού βάρους του ρευστού εισπίεσης.

3.2 Ανάμιξη με μηχανισμό εξάτμισης (Vaporizing - Gas Drive)

Ένας άλλος μηχανισμός για την επίτευξη εκτόπισης με ανάμιξη είναι η δυναμική ανάμιξη (Dynamic Miscibility) ή ανάμιξη με πολλαπλές επαφές (Multiple Contact Miscibility) με μηχανισμό εξάτμισης. Σε αυτή τη μέθοδο γίνεται εξάτμιση των υδρογονανθράκων με μέσο και χαμηλό μοριακό βάρος του ρευστού του ταμιευτήρα και ανάμιξή τους με το ρευστό εισπίεσης, για τη δημιουργία μίας μεταβατικής ζώνης, η οποία είναι αναμίξιμη με το πετρέλαιο καθώς και με το ρευστό από το οποίο ωθείται. Η μέθοδος αυτή ονομάζεται μέθοδος εξατμιζόμενου αερίου (Vaporizing-Gas Drive) ή μέθοδος υψηλής πίεσης αερίου (High Pressure-Gas Drive).

Τα αέρια εισπίεσης που χρησιμοποιούνται σε αυτή τη μέθοδο είναι μεθάνιο, φυσικό αέριο, άζωτο ή ακόμα διοξείδιο του άνθρακα.



Σχήμα 3.2

Απεικόνιση διαδικασίας ανάμιξης κατά τον μηχανισμό ανάμιξης με εξάτμιση.

Το σχήμα 3.2 απεικονίζει το μηχανισμό μέσω του οποίου επιτυγχάνεται ανάμιξη μετά από διαδικασία πολλαπλών επαφών χρησιμοποιώντας για αέριο εισπίεσης μίγμα μεθανίου-φυσικού αερίου³. Στο παράδειγμα, το πετρέλαιο με σύσταση **A** περιέχει υψηλά ποσοστά υδρογονανθράκων με μέσο μοριακό βάρος και βρίσκεται στα δεξιά της κρίσιμης γραμμής ισορροπίας (critical tie line). Το αέριο εισπίεσης δεν είναι απευθείας αναμίξιμο με το πετρέλαιο και αρχικά εκτοπίζει μερικώς το πετρέλαιο χωρίς να αναμιχθεί με αυτό, αφήνοντας ένα μέρος του πετρελαίου πίσω. Υποθέτοντας ότι η αναλογία του πετρελαίου και του αερίου εισπίεσης είναι τέτοιες ώστε να δίνουν την αθροιστική σύσταση **M1**, τότε σύμφωνα με την γραμμή ισορροπίας το υγρό **Y3** και το αέριο **A3** βρίσκονται σε ισορροπία στο σημείο αυτό του ταμιευτήρα. Η περαιτέρω εισπίεση αερίου ωθεί το αέριο **A3** μέσα στον ταμιευτήρα όπου έρχεται σε επαφή με φρέσκο πετρέλαιο κάνοντας μία δεύτερη επαφή. Το αποτέλεσμα της δεύτερης επαφής είναι η δημιουργία μίγματος σύστασης **M2** όπου το υγρό **Y4** και το αέριο **A4** βρίσκονται σε ισορροπία. Κατόπιν το αέριο **A4** προωθείται και η παραπάνω διαδικασία επαναλαμβάνεται. Με τον τρόπο αυτό η σύσταση του αερίου προοδευτικά αλλάζει και εμπλουτίζεται σε ενδιάμεσα συστατικά, ακολουθώντας την καμπύλη των σημείων δρόσου, μέχρι να φτάσει στο κρίσιμο σημείο.

Το ρευστό που η σύσταση του απεικονίζεται στο κρίσιμο σημείο είναι απευθείας αναμίξιμο με το πετρέλαιο του ταμιευτήρα. Έτσι, δημιουργείται μια μεταβατική ζώνη μέσα στον ταμιευτήρα, όπου το μπροστινό μέτωπό της είναι απευθείας αναμίξιμο με το ρευστό του ταμιευτήρα, ενώ το πίσω μέτωπο αναμιγνύεται με το αέριο εισπίεσης. Όταν το σημείο που απεικονίζει τη σύσταση πετρελαίου βρίσκεται πάνω ή στα δεξιά της κρίσιμης γραμμής ισορροπίας (critical tie line) μπορεί να επιτευχθεί ανάμιξη με τη μέθοδο εξάτμισης όταν η σύσταση του ρευστού εισπίεσης βρίσκεται αριστερά της κρίσιμης γραμμής ισορροπίας. Αν η σύσταση του πετρελαίου απεικονίζεται σε σημείο αριστερά της κρίσιμης γραμμής ισορροπίας τότε ο εμπλουτισμός του εισπνεζόμενου αερίου σε ενδιάμεσα συστατικά από το πετρέλαιο θα σταματήσει, όταν η σύσταση του αερίου, μετά από αλληπάλληλες επαφές με το πετρέλαιο, γίνει τέτοια ώστε να υπάρχει μια γραμμής ισορροπίας που να ενώνει το σημείο της σύστασης του πετρελαίου με το σημείο της σύστασης του εμπλουτισμένου αερίου. Για παράδειγμα, στο σχήμα 3.2 το πετρέλαιο **B** θα εμπλουτίζει το αέριο μέχρι τη δημιουργία του αερίου **A1** μιας και κάθε νέα επαφή του φρέσκου πετρελαίου με αέριο **A1** θα δίνει ρευστά σε ισορροπία που οι συστάσεις τους θα βρίσκονται πάνω στην γραμμής ισορροπίας που ενώνει το πετρέλαιο **B** με το αέριο **A1**. Από τα παραπάνω βγαίνει το συμπέρασμα ότι το πετρέλαιο που δύναται να μετατοπισθεί με τη μέθοδο ανάμιξης με εξάτμιση από εισπνεζόμενο μεθάνιο ή φυσικό αέριο, θα πρέπει να είναι ακόρεστο αφού κάθε σημείο σύστασης πάνω και μέσα από την καμπύλη βρασμού θα βρίσκεται αριστερά της κρίσιμης γραμμής ισορροπίας.

Η ελάχιστη πίεση ανάμιξης στην περίπτωση της εξάτμισης επηρεάζεται σημαντικά από τη θερμοκρασία του ταμιευτήρα και από τη σύσταση του πετρελαίου. Για να είναι κατάλληλο το ρευστό του ταμιευτήρα γι' αυτή τη μέθοδο πρέπει να έχει αρκετά μεγάλη περιεκτικότητα σε υδρογονάνθρακες μέσου μοριακού βάρους, δηλαδή από προπάνιο μέχρι εξάνιο. Μείωση της περιεκτικότητας του πετρελαίου σε μεθάνιο και άζωτο επιφέρει μείωση της απαιτούμενης πίεσης ανάμιξης.

Το μέγεθος της διφασικής περιοχής στο ψευδοτριαδικό διάγραμμα εξαρτάται από τη σύσταση των υδρογονανθράκων με μέσο MB, καθώς και από τη σύσταση του βαρέως κλάσματος. Μείωση του ποσοστού (mole %) των υδρογονανθράκων με μέσο MB επιφέρει δημιουργία μεγαλύτερου φακέλου φάσεων και κατ' επέκταση απαιτεί και μεγαλύτερη πίεση για την ανάμιξη. Αύξηση του ποσοστού (mole %), στο βαρύ κλάσμα, των συστατικών με υψηλό MB επιφέρει επίσης αύξηση της διφασικής περιοχής. Συμπερασματικά, αν δύο πετρελαιοί έχουν ίδιες αθροιστικές συστάσεις ενδιάμεσων και

βαρέων κλασμάτων, η ελάχιστη πίεση ανάμιξης μπορεί εντούτοις να διαφέρει από το ένα στο άλλο.

Η ελάχιστη πίεση ανάμιξης, όταν το φέρον ρευστό είναι μεθάνιο, αυξάνεται με αύξηση της θερμοκρασίας λόγω της μείωσης της διαλυτότητας του μεθανίου στους υδρογονάνθρακες, ενώ αντίθετα όταν το φέρον ρευστό είναι άζωτο, αύξηση της θερμοκρασίας επιφέρει μείωση της ελάχιστης πίεσης ανάμιξης⁴ γιατί αυξάνεται η διαλυτότητα του αζώτου στους υδρογονάνθρακες, κυρίως σε θερμοκρασίες πάνω από 100 F⁵.

3.3 Ανάμιξη με χρήση CO₂ ως ρευστό εισπίεσης

Το διοξείδιο του άνθρακα (CO₂) δεν είναι απευθείας αναμίξιμο με το πετρέλαιο του ταμιευτήρα στις συνήθεις πιέσεις ταμιευτήρα. Πειραματικά δεδομένα όμως δείχνουν ότι η ανάμιξη γίνεται με διαδοχικά στάδια επαφής και μάλιστα η ελάχιστη πίεση ανάμιξης είναι μικρότερη από αυτή που χρειάζεται όταν το ρευστό εισπίεσης είναι μεθάνιο (CH₄), άζωτο (N₂) ή καυσαέριο (Flue Gas). Αυτό δίνει μεγάλο πλεονέκτημα στη χρήση του CO₂ διότι οι πιέσεις αυτές είναι πιο εύκολο να δημιουργηθούν και να διατηρηθούν.

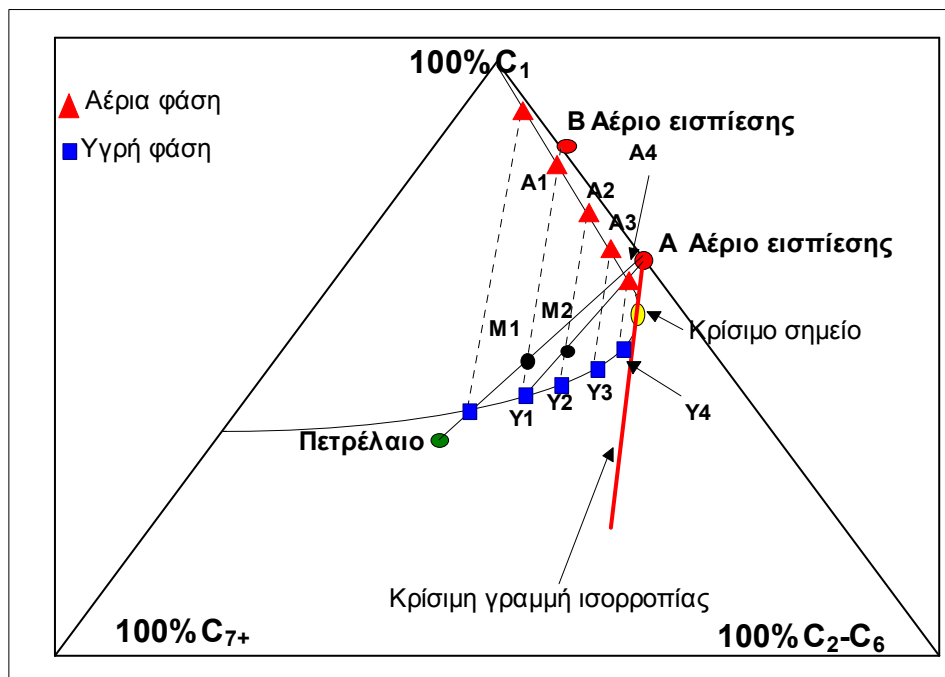
Το CO₂ επιτυγχάνει ανάμιξη σε πιέσεις μικρότερες από το CH₄ διότι εξάγει ή εξατμίζει από το πετρέλαιο συστατικά μεγαλύτερου MB από αυτά που εξατμίζει το CH₄ (αιθάνιο έως πεντάνιο) με αποτέλεσμα να μην χρειάζεται να έχει το πετρέλαιο υψηλά ποσοστά υδρογονανθράκων με χαμηλό MB για την επίτευξη ανάμιξης.^{6,7,8} Συγκεκριμένα παρατηρήθηκε ότι το CO₂ εξάγει από το πετρέλαιο υδρογονάνθρακες που έχουν από 5 έως 30 άτομα άνθρακα (C₅- C₃₀)⁹, και όταν η θερμοκρασία του ταμιευτήρα είναι χαμηλή και το CO₂ βρίσκεται σε υγρή μορφή αλλά και όταν είναι υψηλή και το CO₂ βρίσκεται σε αέρια μορφή. Όλα τα παραπάνω δίνουν σαν αποτέλεσμα την χαμηλή πίεση ανάμιξης που παρουσιάζει το CO₂ ως ρευστό εισπίεσης κατά την ανάμιξή του με το ρευστό του ταμιευτήρα.

3.4 Ανάμιξη με μηχανισμό συμπύκνωσης (Condensing - Gas Drive)

Αναμιξιμότητα μεταξύ του πετρελαίου του ταμιευτήρα και του ρευστού εισπίεσης στη μέθοδο ανάμιξης με συμπύκνωση, επιτυγχάνεται κυρίως με τη μεταφορά μάζας των υδρογονανθράκων με ενδιάμεσο MB του ρευστού εισπίεσης (αιθάνιο, προπάνιο και βουτάνιο) στο ρευστό του ταμιευτήρα. Στις κατάλληλες συνθήκες πίεσης ταμιευτήρα και σύστασης του ρευστού εισπίεσης, το πετρέλαιο του ταμιευτήρα μπορεί να εμπλουτιστεί σε ενδιάμεσου MB υδρογονάνθρακες και να γίνει εφικτή η ανάμιξη του εμπλουτισμένου

πετρελαίου από το ρευστό εισπίεσης. Στο σχήμα 3.3 φαίνεται η διαδικασία ανάμιξης με συμπύκνωση σε ψευδοτριαδικό διάγραμμα.

Η αναμιξιμότητα επιτυγχάνεται μετά από διαδοχικές επαφές του ρευστού εισπίεσης και του πετρελαίου. Αν υποθέσουμε ότι η σύσταση του ρευστού εισπίεσης απεικονίζεται στο σημείο **A**, το σημείο αυτό είναι το σημείο που τέμνει η κρίσιμη γραμμή ισορροπίας την πλευρά του τριαδικού διαγράμματος, που περιλαμβάνει όλα τα μίγματα του μεθανίου με τα ελαφρά κλάσματα των υδρογονανθράκων ($C_2 - C_6$). Το πετρέλαιο δεν είναι απευθείας αναμίξιμο με το του ρευστό εισπίεσης. Γίνεται υπόθεση ότι το μίγμα του πετρελαίου με το ρευστό εισπίεσης βρίσκεται μέσα στη διφασική περιοχή και έχει σύσταση **M1**. Σύμφωνα με την γραμμή ισορροπίας που περνά από το σημείο **M1**, η εκτόνωση του μίγματος θα δημιουργήσει δύο ρευστά σε ισορροπία, το αέριο **A1** και το υγρό **Y1**. Καθώς περισσότερο αέριο σύστασης **A** θα εισέρχεται στον ταμιευτήρα, η επαφή του με το υγρό **Y1** θα δώσει μίγμα σύστασης **M2**, η οποία μετά από εκτόνωση θα δημιουργεί αέρια φάση με σύσταση **A2** και υγρή φάση με σύσταση **Y2** σε ισορροπία. Από το σχήμα 3.3 φαίνεται ότι η σύσταση **Y2** βρίσκεται πιο κοντά στο κρίσιμο σημείο, στο οποίο παρουσιάζεται απευθείας αναμιξιμότητα με το ρευστό εισαγωγής. Επιπλέον επαφές του υγρού ισορροπίας με το αέριο εισπίεσης έχουν σαν αποτέλεσμα τη δημιουργία υγρής φάσης σε ισορροπία με σύσταση ίδια με αυτή του κρίσιμου σημείου και κατόπιν επ'ευθείας ανάμιξή του με το αέριο εισπίεσης.



Σχήμα 3.3.Απεικόνιση ανάμιξης με συμπύκνωση (Condensing Gas Drive) με ψευδοτριαδικό διάγραμμα.

Η διαδικασία διαδοχικών επαφών που παρουσιάστηκε παραπάνω οδηγεί στον εμπλουτισμό του πετρελαίου από ελαφρούς υδρογονάνθρακες και στην απ' ευθείας αναμίξη του με το ρευστό εισπίεσης. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται μηχανισμός ανάμιξης με συμπύκνωση (Condensing Gas Drive) ή μηχανισμός ανάμιξης εμπλουτισμένου αερίου (Rich Gas Drive).

Κατά την μηχανισμό ανάμιξης με συμπύκνωση δημιουργείται μέσα στον ταμιευτήρα μια μεταβατική ζώνη, όπου η σύστασή της στο εμπρός μέρος είναι σχεδόν ίδια με αυτή του πετρελαίου, ενώ στο πίσω μέρος είναι σχεδόν ίδια με τη σύσταση του ρευστού εισπίεσης. Αρκετές επαφές μεταξύ αερίου και πετρελαίου πρόκειται να γίνουν, πριν δημιουργηθεί η μεταβατική αυτή ζώνη. Το ποσοστό σε ελαφρούς υδρογονάνθρακες του ρευστού εισπίεσης έχει μεγάλη σημασία για την ανάμιξη των ρευστών. Χαμηλή περιεκτικότητα ελαφρών υδρογονανθράκων (C_2-C_6) οδηγεί σε ατελή ανάμιξη των ρευστών.

Η ελάχιστη τιμή περιεκτικότητας ελαφρών υδρογονανθράκων για αναμίξιμη μετατόπιση μπορεί να υπολογισθεί, προσδιορίζοντας σε ψευδοτριαδικό διάγραμμα το σημείο τομής της κρίσιμης γραμμής ισορροπίας με την πλευρά του ψευδοτριαδικού διαγράμματος που ενώνει την 100% περιεκτικότητα σε μεθάνιο με την 100% περιεκτικότητα σε ελαφρούς υδρογονάνθρακες. Περιεκτικότητα του αερίου σε ελαφρούς υδρογονάνθρακες μικρότερη της τιμής αυτής κάνει μη εφικτή την ανάμιξη των ρευστών ταμιευτήρα και εισπίεσης. Για παράδειγμα, αν το ρευστό εισπίεσης έχει σύσταση **B**, όπου το σημείο **B** βρίσκεται στην προέκταση της γραμμής ισορροπίας που περνά από τα **A1**, **Y1**, τότε μετά από κάθε επαφή του ρευστού **B** με το υγρό **Y1**, θα προκύπτει υγρό σύστασης **Y1** και αέριο σύστασης **A1**, δηλαδή το υγρό **Y1** δεν θα εμπλουτίζεται περισσότερο.

Σαν γενικός κανόνας μπορεί να θεωρηθεί ότι, η ανάμιξη με τη μέθοδο της συμπύκνωσης είναι δυνατή, αν το σημείο που απεικονίζει τη σύσταση του πετρελαίου βρίσκεται στα αριστερά ή πάνω στη προέκταση της κρίσιμης γραμμής ισορροπίας (critical tie line) και το σημείο που απεικονίζει τη σύσταση του ρευστού εισπίεσης βρίσκεται στα δεξιά ή πάνω στην κρίσιμη γραμμή ισορροπίας στο ψευδοτριαδικό διάγραμμα. Η συγκέντρωση των ενδιάμεσου MB υδρογονανθράκων στο ρευστό εισπίεσης που χρειάζεται για την επίτευξη της ανάμιξης, εξαρτάται από την πίεση του ταμιευτήρα. Αύξηση της πίεσης του ταμιευτήρα οδηγεί σε μείωση της έκτασης της διφασικής περιοχής μέσα στο ψευδοτριαδικό διάγραμμα. Αυτό σημαίνει ότι, η κρίσιμη

γραμμή ισορροπίας θα εμφανίζεται πιο αριστερά του διαγράμματος και το σημείο που θα τέμνει η προέκτασή της τη γραμμή σύστασης μεθανίου - ενδιαμέσων θα βρίσκεται πιο κοντά στο μεθάνιο. Συνεπώς, η συγκέντρωση των υδρογονανθράκων με ενδιαμέσο MB που απαιτείται θα είναι μικρότερη.

Η πίεση και η συγκέντρωση που απαιτείται για την εισπίεση και την ανάμιξη με σύνθεση ενός ρευστού εισπίεσης με το ρευστό του ταμιευτήρα, εξαρτάται από την σύσταση του ρευστού του ταμιευτήρα, το είδος των συστατικών με ενδιαμέσο MB του ρευστού εισπίεσης και την θερμοκρασία του ταμιευτήρα.

Ο Benham et al¹⁰ κατασκεύασε έναν συσχετισμό, όπου υπολογίζονται οι προδιαγραφές της μίξης. Συνέδεσε, μαθηματικά, πετρέλαια με διάφορα ρευστά εισπίεσης αποτελούμενα από μεθάνιο και από υδρογονάνθρακες ενδιαμέσου MB σε διάφορες αναλογίες και κατόπιν υπολόγισε τις κρίσιμες πιέσεις και θερμοκρασίες για τα τελικά μίγματα. Υποθέτοντας ότι ένα αέριο έχει συγκέντρωση σε υδρογονάνθρακες ενδιαμέσου MB μεγαλύτερη ή ίση από αυτή του κρίσιμου μίγματος, τότε αυτό θα εκτοπίσει το πετρέλαιο, αν η θερμοκρασία του ταμιευτήρα είναι ίση με την κρίσιμη θερμοκρασία και η πίεση του ταμιευτήρα είναι ίση ή μεγαλύτερη από την κρίσιμη πίεση. Θεώρησαν όμως ότι η υπόθεση αυτή είναι συντηρητική, αφού η ελάχιστη απαραίτητη συγκέντρωση ενδιαμέσων για την δημιουργία ανάμιξης με συμπύκνωση, είναι μικρότερη από αυτή στο κρίσιμο μίγμα ή στο κρίσιμο σημείο. Αναγνωρίζουν επίσης ότι, ο συσχετισμός αυτός εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τον ακριβή υπολογισμό των κρίσιμων πιέσεων και θερμοκρασιών, που χρησιμοποιούνται στους υπολογισμούς.

Σήμερα, ο υπολογισμός της απαιτούμενης πίεσης και συγκέντρωσης των ενδιαμέσων MB υδρογονανθράκων για ανάμιξη με συμπύκνωση, υπολογίζεται από μαθηματικά μοντέλα, που προσομοιώνουν τις πολλαπλές επαφές πετρελαίου - αερίου και υπολογίζουν την ισορροπία των φάσεων. Πρακτικά, χρειάζεται ρύθμιση των εξισώσεων και των συσχετισμών, που χρησιμοποιούνται στους υπολογισμούς της ισορροπίας των φάσεων, με την βοήθεια πειραματικών PVT δεδομένων για την σωστή πρόβλεψη της αναμιξιμότητας.

Οι Rowe και Silberberg¹¹ έχουν περιγράψει μια μέθοδο για τον υπολογισμό της ισορροπίας των φάσεων στην περίπτωση της ανάμιξης με σύνθεση, στην οποία γίνεται μαθηματική προσομοίωση της διαδικασίας που ακολουθείται για την ανάμιξη του εμπλουτισμένου αερίου με το πετρέλαιο. Μετά από κάθε επαφή γίνονται υπολογισμοί της εκτόνωσης, οι οποίοι περιλαμβάνουν και τους συντελεστές ισορροπίας των συστατικών (K-Values).

Ο Metcalfe¹² υπολογίζει την ισορροπία των φάσεων με την καταστατική εξίσωση των Redlich και Kwong¹³. Ο Corteville¹⁴ υπολογίζει την ισορροπία των φάσεων, χρησιμοποιώντας μοντέλα σύνθεσης, που περιλαμβάνουν στις εξισώσεις τους τη ροή και την ισορροπία των φάσεων.

Ο υπολογισμός των συνθηκών ανάμιξης με μαθηματικά μοντέλα είναι ακριβής, ανάλογα με την ικανότητα του μοντέλου να αναπαραστήσει την ισορροπία των φάσεων κοντά στο κρίσιμο σημείο. Μια μέθοδος που παρουσιάζει αυξημένη ακρίβεια, κοντά στο κρίσιμο σημείο, στους υπολογισμούς της ισορροπίας φάσεων, περιγράφεται από τους Fussell και Vanosik¹⁵.

Η ακρίβεια των μοντέλων υπολογισμού της ισορροπίας φάσεων θα πρέπει να ελέγχεται με πειραματικά δεδομένα.

4. ΠΡΟΕΛΕΥΣΗ ΤΩΝ ΡΕΥΣΤΩΝ ΕΙΣΠΙΕΣΗΣ

4.1 Ρευστά εισπίεσης για ανάμιξη πρώτης επαφής

Για αυτή την περίπτωση ανάμιξης συνιθίζεται η χρήση εισπίεση υγροποιούμενων αερίων πετρελαίου (Liquifiable petroleum gases - LPG) ως ρευστά εισπίεσης. Η εμπειρία έχει δείξει ότι η συνεχής εισπίεση υγροποιούμενων αερίων πετρελαίου (Liquifiable petroleum gases - LPG) για ανάμιξη πρώτης επαφής είναι δαπανηρή και έχει αντικατασταθεί με την εισπίεση περιορισμένου όγκου LPG που συνοδεύεται από την εισπίεση φθηνότερου ρευστού, όπως φυσικό αέριο, το οποίο εκτοπίζει με ανάμιξη το LPG. Τα ρευστά εισπίεσης που χρησιμοποιούνται συχνότερα για ανάμιξη πρώτης επαφής περιέχουν αιθάνιο, προπάνιο και βουτάνιο. Τα ρευστά αυτά θα πρέπει να έχουν την ικανότητα ανάμιξης με το ρευστό του ταμιευτήρα το οποίο ωθούν αλλά και με το φέρον ρευστό από το οποίο ωθούνται. Για να συμβεί αυτό, η πίεση του ταμιευτήρα θα πρέπει να είναι μεγαλύτερη από την απαιτούμενη για ανάμιξη πίεση των συστημάτων ρευστό εισπίεσης - ρευστό ταμιευτήρα και ρευστό εισπίεσης - φέρον ρευστό.

Τα περισσότερα μίγματα υγροποιούμενων αερίων πετρελαίου (LPG) που χρησιμοποιούνται για ανάμιξη πρώτης επαφής προέρχονται από εργοστάσια επεξεργασίας φυσικού αερίου. Αέρια από κοιτάσματα αερίου ή πετρελαίου περιέχουν συχνά μεγάλες ποσότητες LPG, ώστε να είναι οικονομικά συμφέρουσα η κατασκευή εργοστασίων για την παραγωγή LPG. Σε αυτά τα εργοστάσια απομονώνεται αρχικά το αέριο σε απορροφητές ενώ το υγρό υφίσταται κλασματική απόσταξη. Στους πύργους απόσταξης διαχωρίζεται το προπάνιο το βουτάνιο και το μεθάνιο. Τα ελαφρότερα από τα υπόλοιπα παράγωγα της απόσταξης είναι επίσης κατάλληλα για χρήση ως ρευστά εισπίεσης για ανάμιξη πρώτης επαφής. Για την παραγωγή υγροποιούμενων αερίων πετρελαίου χρησιμοποιείται επίσης διαχωρισμός χαμηλής θερμοκρασίας¹⁶.

4.2 Ρευστά εισπίεσης για ανάμιξη με μηχανισμό εξάτμισης

Τα ρευστά εισπίεσης που χρησιμοποιούνται για τη μέθοδο ανάμιξης με εξάτμιση, προέρχονται συνήθως από διαχωριστήρες αερίου που βρίσκονται στο χώρο της εκμετάλλευσης ή παράγονται σαν υποπροϊόν από εργοστάσια διαχείρισης φυσικού αερίου. Υπάρχουν επίσης περιπτώσεις που το αέριο έχει ληφθεί από αγωγούς μεταφοράς αερίου.

Όταν το ρευστό εισπίεσης είναι το καυσαέριο (Flue Gas - CO₂ 12% & N₂ 88% περίπου), παράγεται από εργοστάσια παραγωγής ενέργειας με καύση βενζίνης¹⁷. Από αυτά εργοστάσια παραγωγής ενέργειας, οι ποσότητες καυσαερίων που παράγονται, ξεπερνούν τα 30 εκατ. κυβικά πόδια ανά ημέρα. Όπου απαιτείται (από την εκμετάλλευση) μικρότερη παραγωγή καυσαερίου χρησιμοποιούνται μηχανές καύσης αερίου από τις οποίες με την επίδραση καταλύτη αφαιρούνται τα οξείδια του αζώτου και το καυσαέριο (ρευστό εισπίεσης) που απομένει είναι αφυδατωμένο και πεπιεσμένο. Η παραγωγή καυσαερίου (Flue Gas) με την μέθοδο αυτή φτάνει τα 10 εκατ. κυβικά πόδια ανά ημέρα¹⁸.

Η παραγωγή αζώτου για χρήση του ως ρευστό εισπίεσης γίνεται με κρυονικό διαχωρισμό από τον αέρα ή αλλιώς από καύση αερίου. Κατά τον κρυονικό διαχωρισμό ο αέρας συμπιέζεται στις 6 με 7 ατμόσφαιρες με φυγοκεντρικούς ή αξονικούς συμπιεστές και κατόπιν αφαιρούνται το νερό το διοξείδιο του άνθρακα και οι υδρογονάνθρακες. Τα δύο συστήματα που χρησιμοποιούνται είναι:

- α) κύκλος εναλλαγής θερμότητας όπου παγώνει αρχικά το νερό και το διοξείδιο του άνθρακα στην επιφάνεια του εναλλάκτη και κατόπιν απορροφούνται οι υδρογονάνθρακες από πυριτικό απορροφητή, σε θερμοκρασία κρυονικού διαχωρισμού,
- β) κόσκινα μοριακής απορρόφησης.

Και στις δύο περιπτώσεις το αέριο ψύχεται από τον εναλλάκτη θερμότητας πριν μπει στη στήλη απόσταξης και εισάγεται σε αυτήν σε θερμοκρασία -280 F. Στη στήλη απόσταξης ο αέρας χωρίζεται σε ένα υγρό πλούσιο σε οξυγόνο και σε αέριο άζωτο. Το υγρό απομακρύνεται από το κάτω μέρος της στήλης και συμπυκνώνεται από κατάλληλο συμπυκνωτή σε θερμοκρασία -290 F. Κατόπιν εκτονώνεται σε κρυονική τουρμπίνα για παραγωγή ψύξης και μεταφέρεται στους εναλλάκτες θερμότητας που ψύχουν τον αέρα πριν την εισαγωγή του στη στήλη απόσταξης. Το άζωτο που παράγεται από την απόσταξη θερμαίνεται σε θερμοκρασία περιβάλλοντος από εναλλάκτες θερμότητας και κατόπιν συμπιέζεται στις 5 ατμόσφαιρες. Το οξυγόνο απελευθερώνεται στον αέρα. Ο κύκλος με τον εναλλάκτη θερμότητας για την παραγωγή αζώτου είναι ο πιο διαδεδομένος και η παραγωγή αζώτου σε αυτή την περίπτωση δεν ξεπερνά τα 10 εκατ. κυβικά πόδια ανά ημέρα. Ο κύκλος μοριακών κόσκινων συνήθως χρησιμοποιείται για την παραγωγή οξυγόνου αλλά μπορεί να χρησιμοποιηθεί παράλληλα και για παραγωγή αζώτου σε μεγάλες όμως ποσότητες περίπου 50 εκ. κυβικά πόδια ανά ημέρα.

4.3 Προέλευση CO₂ για ανάμιξη με πετρέλαιο

Συνήθως οι ποσότητες CO₂ που χρειάζονται για εισπίεση είναι μεγάλες. Για παράδειγμα σε έναν μεγάλο ταμιευτήρα όγκου 100 εκατομμυρίων βαρελιών υπολογίζεται ότι πρέπει να εισαχθεί όγκος 50-100 δισεκατομμύρια βαρέλια CO₂, και αυτό θα πρέπει να γίνει σε χρονικό διάστημα το πολύ 10 ετών. Σε ένα μικρό όμως πιλοτικό πρόγραμμα ο ρυθμός έκχυσης CO₂ θα είναι πολύ μικρότερος γύρω στα 0,5 με 1 εκατομμύριο κυβικά πόδια ανά ημέρα για ένα περίπου χρόνο.

Το CO₂ μπορεί να βρεθεί σε φυσικά κοιτάσματα, σαν υποπροϊόν από εργοστάσια παραγωγής αμμωνίας και άλλων χημικών, σαν προϊόν διαχωρισμού σε κοιτάσματα πετρελαίου, σαν υποπροϊόν από εργοστάσια παραγωγής ενέργειας από καύση άνθρακα και από εργοστάσια παραγωγής τσιμέντων και επεξεργασίας ασβεστόλιθων. Το CO₂ μπορεί επίσης να επανεισαχθεί στον ταμιευτήρα αφού πρώτα υποστεί καθαρισμό. Το κόστος του CO₂ και κατ' επέκταση η δυνατότητα χρήσης της πηγής του εξαρτάται από 3 παράγοντες:

- 1) τη φύση της πηγής
- 2) τη θέση της ως προς τον ταμιευτήρα πετρελαίου
- 3) τον τρόπο μεταφοράς του CO₂ από την πηγή του στον ταμιευτήρα.

Το κόστος αυτό διαφέρει από πηγή σε πηγή. Για παράδειγμα ένα φυσικό κοιτάσμα CO₂ για να είναι εκμεταλλεύσιμο θα πρέπει αρχικά να γίνουν γεωτρήσεις και να κατασκευασθούν εγκαταστάσεις παραγωγής, όπως γίνεται για κάθε περίπτωση αέριου κοιτάσματος. Στο κόστος θα πρέπει να συμπεριληφθούν επίσης και τα έξοδα ανίχνευσης και εντοπισμού του κοιτάσματος CO₂ καθώς και τα έξοδα προγραμματισμού της εκμετάλλευσης. Αν η πηγή του CO₂ είναι εργοστάσια παραγωγής ενέργειας θα πρέπει να υπολογιστεί το κόστος διαχωρισμού του CO₂ από τα υπόλοιπα αέρια παράγωγα της διαδικασίας καθώς και το κόστος συμπίεσης του από την ατμοσφαιρική πίεση στην απαιτούμενη για έκχυση στον ταμιευτήρα. Το ίδιο ισχύει και για τα εργοστάσια αμμωνίας όσον αφορά τον καθαρισμό και την συμπίεση.

Πολύ σημαντικός παράγων για την επιλογή της πηγής του CO₂ είναι το κόστος μεταφοράς. Συχνά το CO₂ υγροποιείται και μεταφέρεται από ειδικά διαμορφωμένα φορτηγά ψυγεία. Το υγροποιημένο CO₂ μεταφέρεται προσωρινά σε ειδικά κατασκευασμένους χώρους για την αποθήκευσή του και κατόπιν εισπιέζεται στον ταμιευτήρα^{19,20} αφού πρώτα αεριοποιηθεί μέσα στους σωλήνες μεταφοράς. Αυτός ο τρόπος μεταφοράς ικανοποιεί εκμεταλλεύσεις που χρειάζονται 1 με 5 εκ. κυβικά πόδια

ανά ημέρα και χρησιμοποιείται κυρίως για μικρά πιλοτικά προγράμματα. Για την μεταφορά του CO₂ χρησιμοποιούνται και ειδικά διαμορφωμένα βαγόνια τρένου που έχουν σαν αποτέλεσμα γρηγορότερη και μεγαλύτερη σε όγκο μεταφορά.

Όταν η εκμετάλλευση του πετρελαίου απαιτεί μεγάλες ποσότητες CO₂ για εισπίεση και για μεγάλο χρονικό διάστημα, τότε είναι οικονομική η χρήση αγωγών μεταφοράς. Οι αγωγοί έχουν τη δυνατότητα μεταφοράς μεγάλων ποσοτήτων ανά ημέρα και παρά το ότι έχουν μεγάλο κόστος υλικών και διαμόρφωσης χώρων, θεωρείται ότι είναι αρκετά οικονομικός τρόπος μεταφοράς CO₂, αφού το κόστος μεταφοράς μειώνεται όσο μεγαλύτερες είναι οι ανάγκες ρυθμού παράδοσης και όσο μεγαλύτερο είναι το χρονικό διάστημα που χρησιμοποιούνται.

Το CO₂ βρίσκεται στη φύση σαν καθαρό CO₂ ή με προσμίξεις αζώτου και αέριων υδρογονανθράκων. Η ανάπτυξη και εκμετάλλευση ενός κοιτάσματος CO₂ που είναι γνωστή η θέση του, μεγάλο το μέγεθός του και καθαρό το προϊόν, είναι περίπου ίδια στο κόστος με την παραγωγή του CO₂ από εργοστάσια όπου βγαίνει με προσμίξεις και χαμηλή πίεση. Όταν όμως στο κόστος ανάπτυξης προστεθεί και το κόστος ανίχνευσης και εντοπισμού του CO₂, τότε η παραγωγή γίνεται ασύμφορα ακριβή. Το CO₂ που παράγεται σαν υποπροϊόν σε εργοστάσια παραγωγής αμμωνίας από φυσικό αέριο έχει καθαρότητα περίπου 98% και μπορεί να χρησιμοποιηθεί κατευθείαν χωρίς περαιτέρω καθαρισμό, αφού πρώτα συμπιεστεί, για εισπίεση σε ταμιευτήρα πετρελαίου. Το CO₂ που παράγεται κατά την κατασκευή ουρίας δεν είναι κατάλληλο για ρευστό εισπίεσης. Τα εργοστάσια παραγωγής αμμωνίας έχουν μικρούς ρυθμούς παραγωγής CO₂ γύρω στο 1 εκ. κυβικά πόδια ανά ημέρα και σπάνια 50-70 εκ. κυβικά πόδια ανά ημέρα. Αν υπάρχουν συγκεντρωμένα εργοστάσια σε μικρή απόσταση, τότε είναι οικονομική η κατασκευή αγωγού για μεταφορά CO₂, όπου θα συνεισφέρουν όλα τα εργοστάσια και θα αυξάνεται η παροχή. Τα εργοστάσια παραγωγής συνθετικού φυσικού αερίου παράγουν σήμερα περίπου 40-50 εκ. κυβικά πόδια CO₂ ανά ημέρα, αλλά μελλοντικά μεγαλύτερες εγκαταστάσεις που σχεδιάζονται θα μπορούν να δώσουν ακόμα και 300 εκ. κυβικά πόδια CO₂ ανά ημέρα σαν παραπροϊόν. Το CO₂ που παράγεται από αυτά τα εργοστάσια έχει υψηλή καθαρότητα, αλλά χρειάζεται αφυδάτωση και συμπίεση πριν από την εισαγωγή του στον αγωγό μεταφοράς.

Τα εργοστάσια παραγωγής ενέργειας (Power Plant Stack Gas) είναι η πιο διαδεδομένη πηγή CO₂. Ανάλογα με το μέγεθος του εργοστασίου και του είδους του καυσίμου, ο όγκος παραγωγής του CO₂ κυμαίνεται από δεκάδες σε εκατοντάδες εκατομμύρια κυβικά πόδια ανά ημέρα²¹. Το CO₂ βρίσκεται στον καπνό (Stack Gas) σε

μικρές συγκεντρώσεις (6-16%), ανάλογα με το καύσιμο υλικό το οποίο μπορεί να είναι αέριο, πετρέλαιο ή άνθρακας. Ο καπνός εκτός από CO_2 περιέχει άζωτο, οξυγόνο, ιπτάμενη τέφρα και μερικές φορές οξείδια του θείου. Ο καπνός (Stack Gas) βρίσκεται σε ατμοσφαιρική πίεση και για την παραγωγή του CO_2 πρέπει να καθαριστεί από τα λοιπά αέρια, να αφυδατωθεί και να συμπιεστεί στην απαιτούμενη για μεταφορά πίεση. Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για τον καθαρισμό του CO_2 είναι η χημική ή φυσική απορρόφηση με κατάλληλους διαλύτες και ο κρυονικός διαχωρισμός.

Άλλες πηγές CO_2 σπάνια χρησιμοποιούνται και είναι συνήθως αντισυμβατικές εκτός και αν βρίσκονται πολύ κοντά στον ταμιευτήρα του πετρελαίου. Τέτοιες πηγές είναι τα εργοστάσια παραγωγής υδρογόνου και διαχωρισμού οξειδίων.

4.4 Ρευστά εισπίεσης για ανάμιξη με μηχανισμό συμπύκνωσης

Το εμπλουτισμένο αέριο που χρησιμοποιείται στον μηχανισμό ανάμιξης με συμπύκνωση ως ρευστό εισπίεσης, συχνά παράγεται από διαχωριστήρες σε εκμεταλλεύσεις πετρελαίου ή σε διυλιστήρια, αλλά συνήθως δημιουργείται εμπλουτίζοντας το φυσικό αέριο με υδρογονάνθρακες χαμηλού MB. Το φέρον ρευστό που ωθεί το ρευστό εισπίεσης μπορεί να είναι αέριο διαχωριστήρα, καυσαέρια ή άζωτο. Η προέλευση αυτών των ρευστών έχει αναφερθεί στις παραπάνω παραγράφους.

5. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΑΝΑΜΙΞΗΣ

5.1 Ανάμιξη πρώτης επαφής

Η ανάμιξη πρώτης επαφής σαν μέθοδος παραγωγής περαιτέρω ποσότητας πετρελαίου έχει δοκιμαστεί περισσότερο από τις άλλες μεθόδους ανάμιξης. Έχουν γίνει περισσότερες από 50 δοκιμές της μεθόδου μεταξύ του 1950 και 1960. Οι πρώτες αυτές δοκιμές αποτελούσαν πιλοτικά προγράμματα όπου η ποσότητα εισαγωγής LPG στον ταμιευτήρα ήταν μικρή σε σχέση με τον όγκο του ταμιευτήρα, και εφαρμόσθηκε σε ταμιευτήρες με περιορισμένη έκταση, και σε περιορισμένο αριθμό πηγαδιών. Το μέγεθος των ταμιευτήρων κυμαινόταν μεταξύ δεκάδων και εκατοντάδων εκταρίων με εξαίρεση ορισμένες περιπτώσεις δοκιμών σε ταμιευτήρες μεγάλης έκτασης.

Στις πρώτες δοκιμές γινόταν εισπίεση μιας ποσότητας LPG που την ακολουθούσε συνεχής εισπίεση φυσικού αερίου για την προώθηση του μίγματος. Αργότερα για την αύξηση της κινητικότητας εναλλασσόταν έκχυση νερού και φτωχού καύσιμου αερίου (lean gas). Στην πλειοψηφία των περιπτώσεων η πίεση του ταμιευτήρα ήταν υψηλή, μεγαλύτερη από την απαιτούμενη πίεση ανάμιξης, είτε εξ' αρχής, είτε μετά από εισπίεση ρευστών, έτσι ώστε η ανάμιξη να γίνεται εφικτή και μεταξύ πετρελαίου - διαλύματος εισπίεσης αλλά και μεταξύ διαλύματος εισπίεσης - φέροντος αερίου. Υπήρχαν όμως και περιπτώσεις όπου η πίεση δεν ήταν αρκετά υψηλή για ανάμιξη και η εκτόπιση ήταν περισσότερο μη αναμίξιμη και λιγότερο αναμίξιμη^{22,23}. Ο όγκος της έκχυσης LPG στις παραπάνω δοκιμές κυμαινόταν από 1 έως 20% του όγκου του ταμιευτήρα και η επιπλέον ποσότητα του πετρελαίου που παρήχθη υπολογίζεται πάνω από 10% του συνολικού όγκου του πετρελαίου.

Η μέθοδος ανάμιξης πρώτης επαφής είναι κατάλληλη για ειδικούς τύπους ταμιευτήρων και παρουσιάζει πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα ανάλογα με τις παραμέτρους τους. Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα της μεθόδου είναι ότι με τα LPG η ανάμιξη επιτυγχάνεται σε χαμηλότερες πιέσεις από ότι σε άλλες μεθόδους ανάμιξης. Όταν η πίεση ανάμιξης είναι αρκετή για την ανάμιξη του ρευστού εισπίεσης με το πετρέλαιο δεν είναι και απαραίτητα αρκετή για την ανάμιξη του ρευστού εισπίεσης με το φέρον ρευστό (νερό, CH₄) από το οποίο ωθείται. Γενικά η μέθοδος ανάμιξης πρώτης επαφής έχει καλή εφαρμογή σε ταμιευτήρες με χαμηλή πίεση όπου οι άλλες μέθοδοι ανάμιξης αποτυγχάνουν.

Το μεγαλύτερο μειονέκτημα της μεθόδου είναι το πολύ υψηλό κόστος του LPG. Το κόστος αυτό κάνει αναγκαία την εισπίεση μικρών μόνο ποσοτήτων LPG, πράγμα που μπορεί να οδηγήσει σε ατελή ανάμιξη πετρελαίου - ρευστού εισπίεσης και παγίδευση μέρους του πετρελαίου στον ταμιευτήρα. Ένα άλλο πρόβλημα που μπορεί να δημιουργηθεί λόγω της μικρής ποσότητας εισπίεσης LPG, είναι η εισχώρηση μέρους του φέροντος ρευστού στον όγκο του ρευστού εισπίεσης και η μη αναμίξιμη επαφή του με το πετρέλαιο που έχει σαν αποτέλεσμα την παγίδευση μέρους του πετρελαίου. Ο ακριβής υπολογισμός της ποσότητας του LPG που πρέπει να χρησιμοποιηθεί για ελάχιστο κόστος και ταυτόχρονα ικανοποιητική ανάμιξη είναι δύσκολος και αβέβαιος. Συχνά η επιπλέον αποληψιμότητα είναι μικρή λόγω της μικρής ποσότητας του ρευστού εισπίεσης.

Τα κριτήρια καταλληλότητας ενός ταμιευτήρα για εκμετάλλευση με ανάμιξη πρώτης επαφής είναι τα εξής:

1) Το χαμηλό ιξώδες του πετρελαίου είναι επιθυμητό για την ελαχιστοποίηση των αρνητικών αποτελεσμάτων που προκαλεί η μεγάλη διαφορά των ιξωδών του πετρελαίου και του διαλύματος μίξης. Τιμές μικρότερες του 1 cp θεωρούνται ικανοποιητικές. Ανώτατο όριο ιξώδους πετρελαίου για τέτοιες περιπτώσεις, αν και δεν ορίζεται σαφώς, εκτιμάται τιμή γύρω στα 5 cp.

2) Το βάθος του ταμιευτήρα θα πρέπει να είναι τέτοιο ώστε η πίεση να εξασφαλίζει την ανάμιξη. Για παράδειγμα όταν το ρευστό εισπίεσης αποτελείται από προπάνιο και ωθείται από αέριο, συνήθως CH_4 , η πίεση για ανάμιξη είναι 1100-1300 psi, που αντιστοιχεί σε βάθος 1500-2500 ft²⁴. Όταν το ρευστό εισπίεσης αποτελείται από αιθάνιο, η πίεση ανάμιξης και το απαιτούμενο βάθος είναι μικρότερα. Όταν η θερμοκρασία του ταμιευτήρα είναι μεγαλύτερη από την κρίσιμη θερμοκρασία του ρευστού εισπίεσης, το βάθος και αντίστοιχα η πίεση του ταμιευτήρα θα πρέπει να είναι αρκετά μεγάλα ώστε να εξασφαλίζεται η ανάμιξη.

3) Η κάθετη διαπερατότητα θα πρέπει να είναι περιορισμένη για να μειώνεται ο διαχωρισμός λόγω βαρύτητας, ενώ στους ταμιευτήρες με μικρό πορώδες είναι επιθυμητή υψηλή τιμή της διαπερατότητας για την εξασφάλιση σταθερής ροής.

4) Ταμιευτήρες με ισχυρή ρωγμάτωση, υπερκείμενο στρώμα αερίου, μεγάλο υποκείμενο υδροφόρο ορίζοντα και μεγάλες διαφορές μεταξύ της κάθετης και οριζόντιας διαπερατότητας δεν βοηθούν την εκμετάλλευση του κοιτάσματος πετρελαίου με τη μέθοδο ανάμιξης πρώτης επαφής.

5) Η επιπλέον ποσότητα του πετρελαίου που θα παραχθεί από τον ταμιευτήρα είναι σημαντικό στοιχείο για το πρόγραμμα εκμετάλλευσης. Αν και ο όγκος του επιπλέον πετρελαίου που απαιτείται εξαρτάται από το κόστος του ρευστού έκχυσης, την τιμή του πετρελαίου και τις ιδιότητες του ταμιευτήρα και του ρευστού, ένα ποσοστό 25% του όγκου του ταμιευτήρα αποτελεί μια ελάχιστη τιμή.

5.2 Ανάμιξη με μηχανισμό εξάτμισης

Η μέθοδος ανάμιξης με εξάτμιση αν και δεν έχει χρησιμοποιηθεί σε πολλές περιπτώσεις θεωρείται γενικά επιτυχής διότι έχει βρεθεί αποδοτική και ιδιαίτερα προσοδοφόρα. Έχει χρησιμοποιηθεί σε ταμιευτήρες με μικρή και με μεγάλη έκταση, από 1000 μέχρι 23000 εκτάρια σύμφωνα με την βιβλιογραφία^{25,26}.

Ορισμένα προγράμματα ανάμιξης με εξάτμιση έχουν ολοκληρωθεί ενώ άλλα εξακολουθούν να βρίσκονται σε εξέλιξη για αρκετά χρόνια. Η μέθοδος συχνά εφαρμόζεται σε ταμιευτήρες που βρίσκονται στο τέλος της εκμετάλλευσής τους και αποτελεί ενδιαφέρουσα περίπτωση για ανάληψη του υπολειμματικού όγκου του πετρελαίου. Με την παραπάνω μέθοδο μπορούν να αποκομισθούν σημαντικές ποσότητες υπολειμματικού πετρελαίου όπως αναφέρεται στη βιβλιογραφία^{27,28}. Η μέθοδος έχει εφαρμοστεί επιτυχώς σε ψαμμιτικούς και ασβεστολιθικούς ταμιευτήρες.

Η συνεχής έκχυση του ρευστού εισπίεσης χωρίς να γίνεται έκχυση φέροντος ρευστού είναι μία σημαντική διαφορά μεταξύ της μεθόδου ανάμιξης με εξάτμιση και των άλλων μεθόδων ανάμιξης. Σε σχέση με τις άλλες μεθόδους, όπου ένα μικρό μέρος του διαλύματος εισπνέζεται στον ταμιευτήρα και κατόπιν ωθείται από μία μεγαλύτερη μάζα ρευστού ώθησης, στη μέθοδο ανάμιξης με εξάτμιση χρησιμοποιείται το εισπνιζόμενο ρευστό και ως ρευστό εισπίεσης και ως φέρον ρευστό, με αποτέλεσμα να είναι πάντα επαρκές σε ποσότητα για την εξάτμιση όλου του όγκου του πετρελαίου.

Η αναμιξιμότητα σ' αυτή την περίπτωση μπορεί να χαθεί μόνο όταν η πίεση στο μέτωπο του αερίου μειωθεί κάτω από την πίεση ανάμιξης. Στη μέθοδο ανάμιξης με εξάτμιση η ποσότητα του ρευστού που εισπνέζεται συνήθως είναι μεγάλη σε σχέση με τις άλλες μεθόδους. Για παράδειγμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί όγκος αερίου εισπίεσης ίσος ή μεγαλύτερος από τον όγκο του ταμιευτήρα, σε αντίθεση με τις άλλες μεθόδους ανάμιξης όπου ο όγκος του εισαχθέντος ρευστού δεν ξεπερνά το 25% του όγκου του ταμιευτήρα. Το ρευστό εισπίεσης που παράγεται κατά την εφαρμογή της μεθόδου στο

κοίτασμα, μπορεί να συμπιεστεί στην πίεση ανάμιξης και να επαναεισαχθεί στον ταμιευτήρα για τη διατήρηση της ανάμιξης.

Πλεονέκτημα της μεθόδου ανάμιξης με εξάτμιση αποτελεί η διαθεσιμότητα και το χαμηλό συνήθως κόστος των αέριων υδρογονανθράκων για εισπίεση. Λόγω των παραπάνω συνθηκών θεωρείται οικονομική η εισπίεση και ανακύκλωση μεγάλων όγκων αερίων υδρογονανθράκων πράγμα το οποίο έχει χρησιμοποιηθεί ευρύτατα κατά το παρελθόν, αλλά εκτιμάται ότι στο μέλλον το κόστος τους θα αυξηθεί.

Το καυσάεριο έχει χρησιμοποιηθεί επίσης σαν αέριο εισπίεσης σε αρκετά προγράμματα και θεωρείται μαζί με το άζωτο σαν μία καλή λύση για εισπίεση σε μελλοντικά προγράμματα.

Η μέθοδος ανάμιξης με εξάτμιση έχει εφαρμοστεί με μεγάλη επιτυχία σε ταμιευτήρες που δεν επιδέχονταν εισπίεση νερού λόγω χαμηλής διαπερατότητας.

Η πίεση που απαιτείται για ανάμιξη με εξάτμιση είναι συνήθως μεγάλη και βάζει όριο στο βάθος που πρέπει να βρίσκεται ο ταμιευτήρας για να έχει μια τέτοια πίεση. Το όριο αυτό είναι περίπου 5000 πόδια που αντιστοιχεί σε πίεση 3500 psi και συνήθως η μέθοδος χρησιμοποιείται επιτυχώς σε ταμιευτήρες με βάθος γύρω στα 9000 πόδια ή περισσότερο.

5.3 Ανάμιξη με CO₂ ως ρευστό εισπίεσης

Τα περισσότερα προγράμματα έκχυσης CO₂ ως ρευστό ανάμιξης άρχισαν μετά το 1970 και τα περισσότερα από αυτά ήταν μικρής έκτασης. Λόγω του κόστους του CO₂, ο προγραμματισμός της εκμετάλλευσης προβλέπει συνήθως την τμηματική και όχι την συνεχή έκχυσή του. Συχνά εισπιέζεται ένας μεγάλος όγκος CO₂, περίπου 15% του συνολικού όγκου του ταμιευτήρα και κατόπιν προωθείται από όγκο νερού. Ο σκοπός που γίνεται αυτή η εναλλαγή είναι η επίτευξη ικανοποιητικού λόγου κινητικότητας στο πίσω μέρος του όγκου του ρευστού εισπίεσης (CO₂). Το μειονέκτημα είναι ότι η εκτόπιση του CO₂ από το νερό (φέρων ρευστό) είναι μη αναμίξιμη και ένα μέρος του CO₂ παγιδεύεται στον ταμιευτήρα. Υπάρχουν περιπτώσεις που ο όγκος του CO₂ δεν εισπιέζεται όλος μεμιάς αλλά μικρότερα μέρη του εισπιέζονται εναλλασσόμενα με νερό. Επίσης συμβαίνει συχνά να χρησιμοποιείται αέριο αναμίξιμο με CO₂ ως φέρων ρευστό για την προώθηση του CO₂.

Μετά από πειραματική μελέτη^{29,30} οι Holm και Josendal έδειξαν ότι οι παράγοντες που επηρεάζουν την ελάχιστη πίεση ανάμιξης όταν το ρευστό ανάμιξης είναι το CO₂ είναι οι εξής:

1) Ανάμιξη με διαδοχικές επαφές γίνεται όταν η πυκνότητα του CO₂ είναι αρκετά μεγάλη ώστε το υγρό ή αέριο CO₂ να διαλυτοποιεί τους υδρογονάνθρακες από πεντάνιο έως τριαντάνιο. Για τα συγκεκριμένα πετρέλαια που εξέτασαν οι μελετητές η επιθυμητή πυκνότητα του CO₂ ήταν 0,4 με 0,65 γρ/κ.ε.

2) Η θερμοκρασία του ταμιευτήρα επηρεάζει την ελάχιστη πίεση ανάμιξης διότι επηρεάζει την τιμή της πυκνότητας του CO₂. Υψηλότερες θερμοκρασίες οδηγούν σε υψηλότερες πιέσεις ανάμιξης.

3) Η σύσταση του πετρελαίου και το ποσοστό του σε ενδιάμεσου MB υδρογονάνθρακες (C₂-C₆), είναι σημαντικά για την πίεση ανάμιξης, και συγκεκριμένα όσο μεγαλύτερο το ποσοστό αυτό, τόσο πιο χαμηλή θα είναι η πίεση ανάμιξης.

4) Η πίεση ανάμιξης είναι ακόμα πιο χαμηλή όταν η πλειοψηφία των υδρογονανθράκων από πεντάνιο έως τριαντάνιο έχουν χαμηλό MB.

5) Το είδος των υδρογονανθράκων επηρεάζει αλλά όχι σημαντικά την πίεση ανάμιξης. Για παράδειγμα οι αρωματικοί υδρογονάνθρακες χρειάζονται χαμηλότερη πίεση ανάμιξης.

6) Οι ιδιότητες του βαρέως κλάσματος επηρεάζουν την τιμή της πίεσης ανάμιξης, αλλά περισσότερο την επηρεάζει το ποσοστό του επί της συνολικής μάζας του πετρελαίου.

7) Για την επίτευξη της ανάμιξης δεν είναι απαραίτητοι υδρογονάνθρακες από αιθάνιο έως βουτάνιο.

8) Η παρουσία του μεθανίου στο πετρέλαιο δεν επιδρά στην πίεση ανάμιξης.

Η μέθοδος ανάμιξης με εξάτμιση με την χρήση CO₂ έχει εφαρμοστεί τουλάχιστον 33 φορές μέχρι το 1982 και σχεδόν όλες οι περιπτώσεις άρχισαν μετά το 1970. Τα περισσότερα ήταν πιλοτικά προγράμματα, αλλά τουλάχιστον 3 από αυτά ήταν αρκετά μεγάλα ώστε να θεωρηθούν εμπορικού μεγέθους.^{31,32}

Σε μερικές περιπτώσεις το CO₂ μπορεί να αναμιχθεί σε μεγάλο ποσοστό με το πετρέλαιο ακόμα και αν δεν επιτευχθεί η πίεση ανάμιξης. Υπάρχουν περιπτώσεις όπου το CO₂ εισπιάστηκε σε ταμιευτήρες με πίεση κάτω από την πίεση ανάμιξης και βελτίωσε την αποληψιμότητα του κοιτάσματος.^{33,34,35}

Αντίθετα με την περίπτωση εισπίασης υδρογονανθράκων για ανάμιξη, το CO₂ χρησιμοποιείται κυρίως κατά την τριτογενή παραγωγή, αντικατοπτρίζοντας την ανάγκη

για την ολική απόληψη των κοιτασμάτων τα τελευταία χρόνια. Τα προγράμματα έκχυσης CO₂ συνήθως γίνονται σε ταμιευτήρες με ψαμμιτικά ή ασβεστολιθικά πετρώματα και η μέθοδος έχει χρησιμοποιηθεί με ικανοποιητικά αποτελέσματα σε ομοιογενείς αλλά και σε ανομοιογενείς ταμιευτήρες, ενώ δεν επηρεάζεται από την κλίση ή όχι των στρωμάτων.

Στα περισσότερα προγράμματα έκχυσης CO₂ και κατά την δευτερογενή αλλά και κατά την τριτογενή παραγωγή έχει παρατηρηθεί ότι το CO₂ αρχίζει να παράγεται νωρίς από τα πηγάδια παραγωγής, συνήθως μετά από εισπίεση CO₂ ή νερού και CO₂ μαζί, με όγκο ίσο με 0,05 έως 0,2 του όγκου του ταμιευτήρα, πράγμα που είναι σύνηθες και στην περίπτωση έκχυσης αέριων υδρογονανθράκων στους ταμιευτήρες. Το φαινόμενο αυτό μπορεί να μειωθεί με διορθωτικές κινήσεις όπως:

- 1) εναλλασσόμενη εισπίεση CO₂ - νερού³⁶,
- 2) απομόνωση ζωνών³⁷,
- 3) μείωση της πίεσης εισαγωγής του CO₂³⁸,

Υπάρχουν περιπτώσεις προγραμμάτων εκμετάλλευσης όπου μπορεί να προσδιοριστεί η επιπλέον παραγωγή υδρογονανθράκων λόγω της έκχυσης CO₂ από την ανάλυση των στοιχείων παραγωγής. Η αύξηση της απόληψης που αναφέρεται στη βιβλιογραφία^{39,40}, κυμαίνεται από 3,5% έως 18% του συνολικού όγκου του πετρελαίου. Ο υπολειμματικός κορεσμός του πετρελαίου μετά την έκχυση CO₂ έχει προσδιοριστεί σε ορισμένα προγράμματα από τη μελέτη δειγμάτων πυρήνων που έχουν ανακτηθεί από τον ταμιευτήρα και έχουν μεταφερθεί στο εργαστήριο χωρίς να μειωθεί η ποσότητα και να αλλοιωθεί η ποιότητα των ρευστών κάτω από συνθήκες ταμιευτήρα. Οι δοκιμές αυτές δείχνουν μειωμένο το βαθμό κορεσμού του πετρελαίου σε σχέση με αυτόν που είχαν πριν την εισπίεση του CO₂.

Ακόμα και όταν υπάρχει παγίδευση του πετρελαίου μέσα στον ταμιευτήρα λόγω της εναλλασσόμενης έκχυσης CO₂ - νερού, η εκμετάλλευση είναι επικερδής, εφόσον δεν απομονώνονται μεγάλοι όγκοι νερού σε συγκεκριμένο χώρο του ταμιευτήρα, κάνοντας τη διέλευση του πετρελαίου από εκεί ακόμα δυσκολότερη.

Για να εφαρμοστεί η μέθοδος εκτόπισης με ανάμιξη χρησιμοποιώντας CO₂ θα πρέπει να συντηρείται η πίεση ανάμιξης στο μεγαλύτερο μέρος του ταμιευτήρα. Η πίεση αυτή, για την περίπτωση του CO₂ είναι μικρότερη από την πίεση που χρειάζεται όταν ρευστά εισπίεσης είναι μεθάνιο, άζωτο, φυσικό αέριο ή καπνός, πράγμα που δίνει πλεονέκτημα στη χρήση CO₂ για την εκτόπιση του πετρελαίου. Επίσης το CO₂ μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε ταμιευτήρες μικρότερου βάθους και πετρέλαια μεγαλύτερης

ποικιλίας από ότι τα άλλα αέρια εισπίεσης. Σαν ελάχιστο βάθος ταμιευτήρα για εφαρμογή της μεθόδου θεωρούνται τα 2500 πόδια.

Η πίεση ανάμιξης αυξάνεται με τη μείωση της πυκνότητας του πετρελαίου και ταμιευτήρες όπου του πετρελαίο έχει πυκνότητα μικρότερη από 27° API θεωρείται⁵⁹ ότι δεν μπορούν να χρησιμοποιήσουν CO₂ για ανάμιξη. Επειδή το CO₂ έχει πολύ χαμηλό ιξώδες, ο λόγος κινητικότητάς του με το πετρελαίο μπορεί να είναι μεγάλος και να επηρεάζει δυσμενώς την εκτόπιση. Για τον λόγο αυτό ταμιευτήρες που περιέχουν πετρελαίο με υψηλό ιξώδες δεν είναι κατάλληλοι για εισπίεση CO₂. Δεν υπάρχει σαφής τιμή ιξώδους του πετρελαίου πάνω από την οποία δεν θα πρέπει να χρησιμοποιείται CO₂, αλλά θεωρείται,^{41,42} ότι 10 με 12 cp είναι μια ενδεικτική ανώτερη τιμή. Χαμηλή τιμή της σχετικής διαπερατότητας του CO₂ θα βοηθούσε τη διαδικασία εκτόπισης, πράγμα που επιτυγχάνεται με την εναλλασσόμενη έκχυση CO₂ - νερού.

Όπως και κατά την εισπίεση ρευστών, η μεγάλη ανομοιογένεια του ταμιευτήρα οδηγεί στη γρήγορη και αυξημένη παραγωγή CO₂. Βέβαια ακόμη και στις καλύτερες περιπτώσεις παράγεται ένα μέρος του CO₂, το οποίο όμως μπορεί να επαναεισαχθεί στον ταμιευτήρα, οπότε η εκμετάλλευση θα είναι οικονομική. Μεγάλη ρωγμάτωση οδηγεί στη μείωση του παραγόμενου πετρελαίου ανά μονάδα εισαχθέντος CO₂ κάνοντας την εκμετάλλευση ασύμφορη. Η ιστορία της εισπίεσης νερού που έχει προηγηθεί, η γνώση της γεωλογίας της περιοχής, οι διαγραφίες και οι δοκιμές ροής των πηγαδιών μπορούν να μας πληροφορήσουν για το μέγεθος της ανομοιογένειας του ταμιευτήρα.

Ο βαθμός κορεσμού του πετρελαίου πριν από την εισπίεση του CO₂ για ανάμιξη και εκτόπιση θα πρέπει να είναι πάνω από 20% του συνολικού όγκου των πόρων, για την συμφέρουσα οικονομικά απόληψη πετρελαίου. Το CO₂ και το καυσαέριο (flue gas) συγκρινόμενο με το φυσικό αέριο, χρειάζονται χαμηλότερες πιέσεις για την επίτευξη ανάμιξης με εξάτμιση. Σύμφωνα με μελέτες⁴³ όταν το CO₂ και το καυσαέριο είναι ρευστά εισπίεσης, το μεθάνιο του πετρελαίου αντιδρά ως ενδιάμεσου MB υδρογονάνθρακας, πράγμα που εξηγεί τη μείωση της απαιτούμενης πίεσης ανάμιξης με την αύξηση του ποσοστού του μεθανίου στο πετρελαίο. Για ορισμένα πετρελαία, η διαφορά στην ελάχιστη πίεση ανάμιξης, όταν ρευστά εισπίεσης είναι το CO₂ και το καυσαέριο σε σχέση με την περίπτωση που ρευστά εισπίεσης είναι διάφορα μίγματα ελαφρών υδρογονανθράκων, μπορεί να είναι μικρή, της τάξης των λίγων psi⁴⁴. Κάτω από συνθήκες υψηλότερων θερμοκρασιών, οι παραπάνω διαφορές μπορεί να γίνουν ακόμα μικρότερες.

Αν και η όλη εικόνα της χρήσης της μεθόδου εισπίεσης CO₂ φαίνεται πολλά υποσχόμενη, δεν υπάρχουν αρκετά στοιχεία που να βεβαιώνουν για το πραγματικό της δυναμικό. Η γενίκευση των αποτελεσμάτων από διάφορα προγράμματα που έχουν τελειώσει είναι δύσκολη λόγω της ανομοιότητας των ταμιευτήρων στους οποίους έχει εφαρμοστεί η μέθοδος.

5.4 Ανάμιξη με μηχανισμό συμπύκνωσης

Οι περισσότερες εκμεταλλεύσεις, στις οποίες έχει χρησιμοποιηθεί ο μηχανισμός ανάμιξης με συμπύκνωση, είναι μεγάλες σε μέγεθος, αντίθετα με την περίπτωση εφαρμογής άλλων μηχανισμών ανάμιξης. Η έκταση των ταμιευτήρων στους οποίους έχει εφαρμοστεί ο μηχανισμός ανάμιξης με συμπύκνωση κυμαίνεται από εκατοντάδες μέχρι χιλιάδες εκτάρια και ο όγκος του ρευστού εισπίεσης είναι περίπου ίσος με το μισό όγκο του ταμιευτήρα. Η μέθοδος έχει εφαρμοστεί σε ασβεστολιθικά και ψαμμιτικά πετρώματα, σε οριζόντιους και με κλίση ταμιευτήρες.

Η εφαρμογή του μηχανισμού ανάμιξης με συμπύκνωση εμφανίζει κοινά χαρακτηριστικά με το μηχανισμό ανάμιξης πρώτης επαφής. Χρησιμοποιείται δηλαδή στη δευτερογενή παραγωγή και παρουσιάζει μειωμένο λόγο παραγωγής αερίου προς πετρελαίου (GOR) και αυξημένη την πίεση, όταν το μέτωπο εκτόπισης φτάνει στα πηγάδια παραγωγής. Στην τριτογενή παραγωγή ωθεί το υπολειμματικό πετρέλαιο που έχει εγκλωβιστεί μετά την έκχυση του νερού.^{45,46} Το μίγμα που έχει σχηματισθεί από την αλληλεπίδραση των ρευστών εισπίεσης και ταμιευτήρα μέσα στον ταμιευτήρα φτάνει στα πηγάδια παραγωγής σχετικά νωρίς, δηλαδή μετά από εισπίεση όγκου ρευστού ίσου περίπου με 5% του όγκου του ταμιευτήρα. Ο όγκος του ρευστού που εισπνέζεται για την μέθοδο ανάμιξης με σύνθεση ποικίλει από 2% έως 55% του όγκου του ταμιευτήρα. Ο όγκος αυτός είναι κατά μέσο όρο μεγαλύτερος από τον όγκο που χρησιμοποιείται στο μηχανισμό ανάμιξης πρώτης επαφής. Εναλλασσόμενη εισπίεση αερίου - νερού έχει χρησιμοποιηθεί και θεωρείται ότι βελτιώνει την απόδοση του προγράμματος.

Ο μηχανισμός ανάμιξης με συμπύκνωση είναι κατάλληλος σε ορισμένες μόνο περιπτώσεις ταμιευτήρων και θα πρέπει να προηγηθεί προσεκτική μελέτη πριν από την εφαρμογή του. Η αναμιξιμότητα μπορεί να επιτευχθεί σε πιέσεις κοντά σε αυτές που χρειάζονται για ανάμιξη πρώτης επαφής και χαμηλότερα από τις απαιτούμενες για ανάμιξη με εξάτμιση.

Η ευελιξία του σχεδιασμού και της εκμετάλλευσης είναι ένα μεγάλο πλεονέκτημα της μεθόδου. Αν η πίεση του ταμιευτήρα μειωθεί σε τιμή κάτω από την πίεση ανάμιξης κατά την διάρκεια της εκμετάλλευσης, η αναμιξιμότητα μπορεί να επανέλθει με αλλαγή στη σύσταση του ρευστού εισπίεσης. Επίσης, η σύσταση του ρευστού εισπίεσης μπορεί να ρυθμιστεί, ώστε να μην αυξηθεί η πίεση του ταμιευτήρα. Μια βέλτιστη οικονομική ισορροπία μπορεί να επιτευχθεί μεταξύ των πλεονεκτημάτων της χαμηλής πίεσης λειτουργίας (μειωμένο κόστος συμπίεσης, μικρότερος όγκος αερίου για εισπίεση υπό κανονικές συνθήκες) και των πλεονεκτημάτων της λειτουργίας κάτω από υψηλές πιέσεις (μειωμένος εμπλουτισμός αερίου, μεγαλύτερη παραγωγή).

Το κόστος και οι ρυθμοί παράδοσης του εμπλουτισμένου και του φέροντος ρευστού είναι σημαντικοί παράγοντες για την επιλογή της μεθόδου ανάμιξης. Ιδιαίτερα επιθυμητή είναι η περίπτωση κατά την οποία, το αέριο του διαχωριστήρα χρειάζεται μικρό μόνο εμπλουτισμό σε ενδιάμεσου MB υδρογονάνθρακες και αυτοί μπορούν να βρεθούν κοντά στο χώρο της εκμετάλλευσης.

Άλλα σημαντικά κριτήρια για την επιλογή ενός ταμιευτήρα για εφαρμογή της μεθόδου ανάμιξης με σύνθεση είναι τα εξής:

1) Το ιξώδες του ταμιευτήρα είναι επιθυμητό να έχει τιμή μικρότερη από 1cp, ενώ μέγιστη τιμή ιξώδους για την εφαρμογή της μεθόδου θεωρείται η τιμή των 5cp.

2) Η συνήθης πίεση εφαρμογής της μεθόδου είναι τα 1500 με 3000 psi αν και σπάνια απαιτούνται και μεγαλύτερες πιέσεις, ανάλογα με την πυκνότητα του πετρελαίου και την θερμοκρασία του ταμιευτήρα. Το ελάχιστο βάθος του ταμιευτήρα θα πρέπει να είναι 2000 με 3000 πόδια (700-1000 μέτρα), ώστε να απαντώνται απαιτούμενες πιέσεις.

3) Ταμιευτήρες με υψηλή ρωγμάτωση, υπερκείμενο αέριο και υποκείμενο υδροφόρο κάνουν αδύνατη την εκμετάλλευση του ταμιευτήρα με τον μηχανισμό ανάμιξης με συμπύκνωση.

4) Η ποσότητα του πετρελαίου που θα παραχθεί με τον μηχανισμό ανάμιξης με συμπύκνωση, πρέπει να είναι ικανή να υπερκαλύψει το υψηλό κόστος εφαρμογής της μεθόδου. Ανάλογα με το κόστος του ρευστού εισπίεσης, την τιμή του πετρελαίου και τις ιδιότητες του ταμιευτήρα, καθορίζεται η απαιτούμενη ποσότητα πετρελαίου που θα πρέπει να παραχθεί με το μηχανισμό ανάμιξης με συμπύκνωση. Εκτιμάται ότι, η ελάχιστη απαιτούμενη ποσότητα πετρελαίου που χρειάζεται να παραχθεί για να κριθεί οικονομική η εκμετάλλευση με τον μηχανισμό που περιγράφεται σε αυτό το κεφάλαιο είναι το 25% του όγκου των πόρων του ταμιευτήρα.

6. ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΠΡΟΒΛΕΨΗ ΤΗΣ ΕΛΑΧΙΣΤΗΣ ΠΙΕΣΗΣ ΑΝΑΜΙΞΗΣ (MINIMUM MISCIBILITY PRESSURE)

Κατά καιρούς έχουν χρησιμοποιηθεί πολλές μέθοδοι για τον προσδιορισμό και την πρόβλεψη των συνθηκών ανάμιξης των ρευστών εισπίεσης με ρευστά του ταμιευτήρα και κατ' επέκταση της ελάχιστης πίεσης ανάμιξης.

Η πλέον αξιόπιστη μέθοδος προσδιορισμού των συνθηκών ανάμιξης του αερίου εισπίεσης με το ρευστό του ταμιευτήρα είναι η διεξαγωγή εργαστηριακών πειραμάτων εισπίεσης σε λεπτό σωλήνα γεμισμένο με πορώδες υλικό (slim tube).

Ο σχηματισμός ψευδοτριάδικών διαγραμμάτων πειραματικά, μέσω διαδοχικών ισορροπιών αερίου και υγρού σε οπτικά κελία, είναι δύσκολος και χρονοβόρος, αν και μια νέα μέθοδος⁴⁷ έχει βελτιώσει την ταχύτητα των πειραμάτων αυτών. Ένα επιπλέον μειονέκτημα της μεθόδου είναι ότι, οι γραμμές ισορροπίας που σχηματίζονται στο ψευδοτριάδικό διάγραμμα, με την παρατήρηση σε οπτικά κελία, μπορεί να είναι διαφορετικές για τα ίδια ρευστά¹ στις ίδιες συνθήκες, ανάλογα με το αν τα ρευστά αναμιγνύονται δυναμικά ή στατικά μέσα στο οπτικό κελί.

Οι συνθήκες ανάμιξης μπορούν επίσης να προβλεφθούν υπολογίζοντας την ισορροπία της αέριας με την υγρή φάση στις συνθήκες επαφής, χρησιμοποιώντας καταστατικές εξισώσεις και συντελεστές ισορροπίας, ενώ παράλληλα ένα μαθηματικό μοντέλο προσομοιώνει τη ροή στο πορώδες μέσο. Στη βιβλιογραφία περιγράφονται ορισμένες τεχνικές για τον υπολογισμό της ισορροπίας των φάσεων σε συστήματα ρευστού εισπίεσης - ρευστού ταμιευτήρα.^{12,15,48} Οι προβλέψεις με τη χρήση καταστατικών εξισώσεων και συντελεστών ισορροπίας δεν είναι ιδιαίτερα ακριβείς σε όλες τις περιπτώσεις μελετών, ενώ ιδιαίτερα προβλήματα δημιουργούνται κοντά στο κρίσιμο σημείο. Συχνά, χρειάζεται ρύθμιση των εξισώσεων με τη βοήθεια πειραματικών δεδομένων. Ένας συνδυασμός των υπολογισμών της ισορροπίας φάσεων με τις εξισώσεις ροής στο πορώδες μέσο, μπορούν να φέρουν βελτιωμένα αποτελέσματα.

Οι συσχετισμοί που εξάγονται από τα πειραματικά δεδομένα, προσφέρουν σε μερικές περιπτώσεις ικανοποιητική ακρίβεια στην πρόβλεψη, προσεγγίζοντας τις πραγματικές τιμές πίεσης ανάμιξης με διαφορές της τάξης των 50 με 100 psi, αλλά ορισμένες φορές οι ίδιοι συσχετισμοί μπορούν να πέσουν έξω στην πρόβλεψη ακόμα και 1000 psi. Από τα παραπάνω προκύπτει σαν γενικό συμπέρασμα ότι, ποτέ δεν είναι

σίγουρο πόσο ακριβής είναι η πρόβλεψη των συσχετισμών για την κάθε περίπτωση συστήματος ρευστού εισπίεσης-ρευστού ταμιευτήρα.

Ο πειραματικός προσδιορισμός της πίεσης ανάμιξης συνιστάται για τις περιπτώσεις που χρειάζεται μεγάλη ακρίβεια. Όταν η απαιτούμενη ακρίβεια δεν είναι μεγάλη, τότε η χρήση συσχετισμών και υπολογισμών μέσω καταστατικών εξισώσεων και συντελεστών ισορροπίας είναι επιθυμητή, λόγω του μικρού κόστους σε χρόνο και χρήμα για την εφαρμογή τους.

Οι παραπάνω μέθοδοι μπορούν να διαχωριστούν σε τρεις βασικές κατηγορίες:

- α) Εργαστηριακές δοκιμές εκτόπισης σε λεπτό σωλήνα (slim tube displacement)
- β) Εργαστηριακή προσομοίωση της διαδικασίας ανάμιξης με χρήση κελιού PVT με παράθυρο (PVT windowed-cell)
- γ) Μαθηματική προσομοίωση της ισορροπίας των φάσεων με χρήση καταστατικών εξισώσεων και συντελεστών ισορροπίας

6.1 Εργαστηριακές δοκιμές εκτόπισης σε λεπτό σωλήνα (slim tube displacement)

Τα πειράματα εκτόπισης που προσδιορίζουν την πίεση ανάμιξης σε σύστημα ρευστού εισπίεσης - ρευστού ταμιευτήρα πρέπει να πληρούν τις εξής προϋποθέσεις:

- 1) Η δυναμική ανάμιξη να μπορεί να δημιουργηθεί σε μεγάλο μέρος του μήκους του σωλήνα και όχι μόνο κοντά στο τέλος του
- 2) Ο σχεδιασμός των πειραμάτων πρέπει να είναι τέτοιος ώστε, μετά από εισπίεση ρευστού με όγκο ίσο με 1,2 φορές τον όγκο των πόρων να έχει εκτοπισθεί όλος ο όγκος του ρευστού του ταμιευτήρα χωρίς να έχει παραμείνει στο σωλήνα υπολειμματικός κορεσμός όταν η πίεση παρουσιάζεται ικανή για την ανάμιξη των ρευστών.

Η δυναμική ανάμιξη μεταξύ ρευστών εισπίεσης και ταμιευτήρα πραγματοποιείται μετά από κάποια περίοδο μη αναμίξιμης εκτόπισης του πετρελαίου από το ρευστό εισπίεσης. Ο υπολογισμός της απόστασης που χρειάζεται για να αρχίσει η αναμίξιμη εκτόπιση είναι δύσκολος, εντούτοις υπάρχουν εμπειρικοί τύποι που την υπολογίζουν και έτσι επιλέγεται το βέλτιστο μήκος του σωλήνα για την πραγματοποίηση του πειράματος.⁴⁹

Συχνά παρατηρούνται σε τέτοια πειράματα φαινόμενα διείσδυσης υπό μορφή γλώσσας λόγω ιξώδους ή βαρύτητας (viscous fingering-gravity tonging), τα οποία οδηγούν σε εσφαλμένη επεξήγηση των αποτελεσμάτων.

Τέτοια φαινόμενα παρουσιάζονται συνήθως σε πειράματα όπου η διάμετρος του σωλήνα ποικίλει από λίγα χιλιοστά έως μερικά εκατοστά του μέτρου ενώ το μήκος του ποικίλει από μισό έως πέντε μέτρα. Όπως είναι προφανές δεν πρόκειται για λεπτό σωλήνα αλλά για περίπτωση σωλήνα μεγαλύτερου σε μέγεθος από τον λεπτό ο οποίος χρησιμοποιήθηκε στο παρελθόν από ερευνητές αλλά δεν χρησιμοποιείται πλέον συχνά από την πετρελαϊκή βιομηχανία.

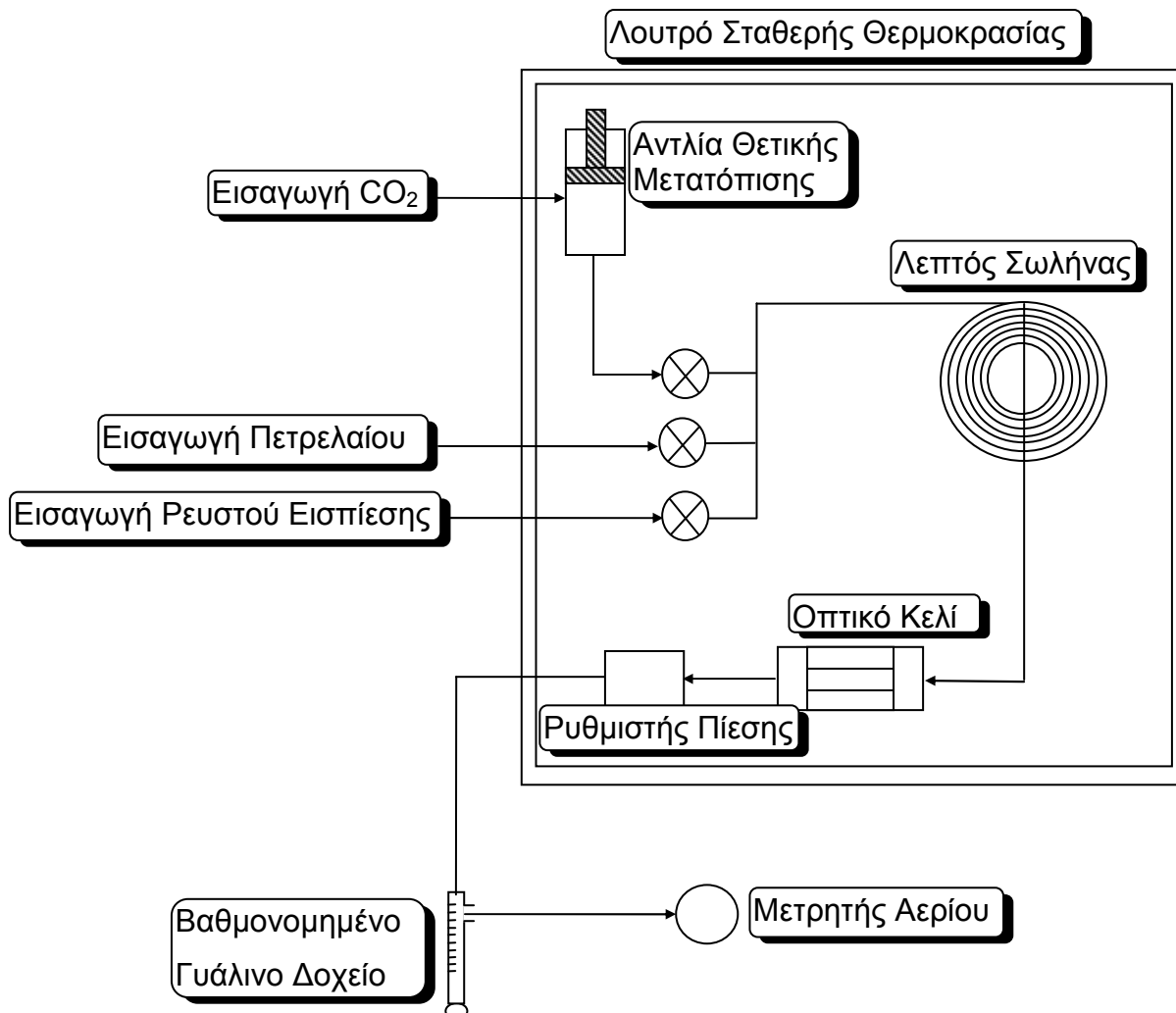
Τα φαινόμενα αυτά οφείλονται στη μεγάλη διαφορά ιξώδους ή πυκνότητας μεταξύ του ρευστού εισπίεσης και του εκτοπιζόμενου πετρελαίου. Για τη εξάλειψη των προβλημάτων που δημιουργούνται λόγω της διαφοράς στην πυκνότητα ή στο ιξώδες των δύο ρευστών χρησιμοποιούνται πειράματα σταθερής βαρύτητας (gravity stable experiments). Κατά την μέθοδο αυτή, η διαφορά της πυκνότητας μεταξύ των δύο ρευστών μηδενίζεται με την εισπίεση του ρευστού στο άνω μέρος του σωλήνα, διενεργώντας τη μετατόπιση από πάνω προς τα κάτω. Σε περίπτωση που το ρευστό εισπίεσης είναι πιο πυκνό από το ρευστό προς μετατόπιση, εισπνέζεται στο κάτω μέρος του σωλήνα και η μετατόπιση διενεργείται από κάτω προς τα πάνω.

Για σταθερή μετατόπιση υπάρχει μια μέγιστη ταχύτητα ροής. Όταν η ταχύτητα μετατόπισης είναι μικρότερη από αυτή, τότε η ταχύτητα του μετώπου εκτόπισης είναι σταθερή σε όλη του την επιφάνεια και τα συμπεράσματα που εξαγονται για το χρόνο και την ποσότητα ανάληψης του ρευστού στη συγκεκριμένη πίεση του πειράματος κάτω από αναμίξιμη μετατόπιση, είναι αξιόπιστα.

Όταν η διαφορά πυκνότητας μεταξύ του πετρελαίου και του ρευστού εισπίεσης είναι μικρή, όπως συνήθως συμβαίνει στην περίπτωση του CO_2 , η ταχύτητα που απαιτείται για τη σταθερή μετατόπιση, είναι πολύ μικρή. Στις περιπτώσεις αυτές, για την καταπολέμηση διεισδύσεων υπό μορφή γλώσσας που δημιουργούνται με την αύξηση της ταχύτητας ροής, χρησιμοποιούνται σωλήνες πολύ μικρής διαμέτρου (slim tube). Σε αυτούς τους σωλήνες εμφανίζεται εντονότερο το φαινόμενο της εγκάρσιας διάχυσης (transverse dispersion), που μειώνει ή τουλάχιστον εμποδίζει την αύξηση του μήκους των γλωσσιδίων του ρευστού εισπίεσης μέσα στο πορώδες μέσο. Το φαινόμενο της εγκάρσιας διάχυσης (μεταφορά μάζας μεταξύ των ρευστών με διεύθυνση κάθετη προς τη διεύθυνση της εκτόπισης) εμφανίζεται εντονότερο στους λεπτούς σωλήνες διότι σε αυτούς η διάμετρος των γλωσσιδίων που τείνει να αυξηθεί ολοένα και περισσότερο

περιορίζεται γρήγορα από την μικρή διάμετρο του σωλήνα και τότε το ρευστό εισπίεσης που έχει σχηματίσει τα γλωσσίδια αυτά αρχίζει να εναλλάσσει μάζα και με το ρευστό του ταμειυτήρα που προηγουμένως είχε προσπεραστεί από τα γλωσσίδια.

Η επιλογή της διαμέτρου των κόκκων του υλικού με τους οποίους γεμίζεται ο λεπτός σωλήνας είναι δύσκολη, διότι αύξησή της επιφέρει αύξηση στην αντίστροφη διάχυση και κατ' επέκταση μείωση της διείδυσης υπό μορφή γλώσσας, αλλά παράλληλα αυξάνει το μήκος της μη αναμίξιμης μετατόπισης. Το μέγεθος της διαμέτρου των κόκκων θα πρέπει να έχει τιμή τέτοια, ώστε να ικανοποιεί ταυτόχρονα την αξιοπιστία, αλλά και την ταχύτητα των δοκιμών.

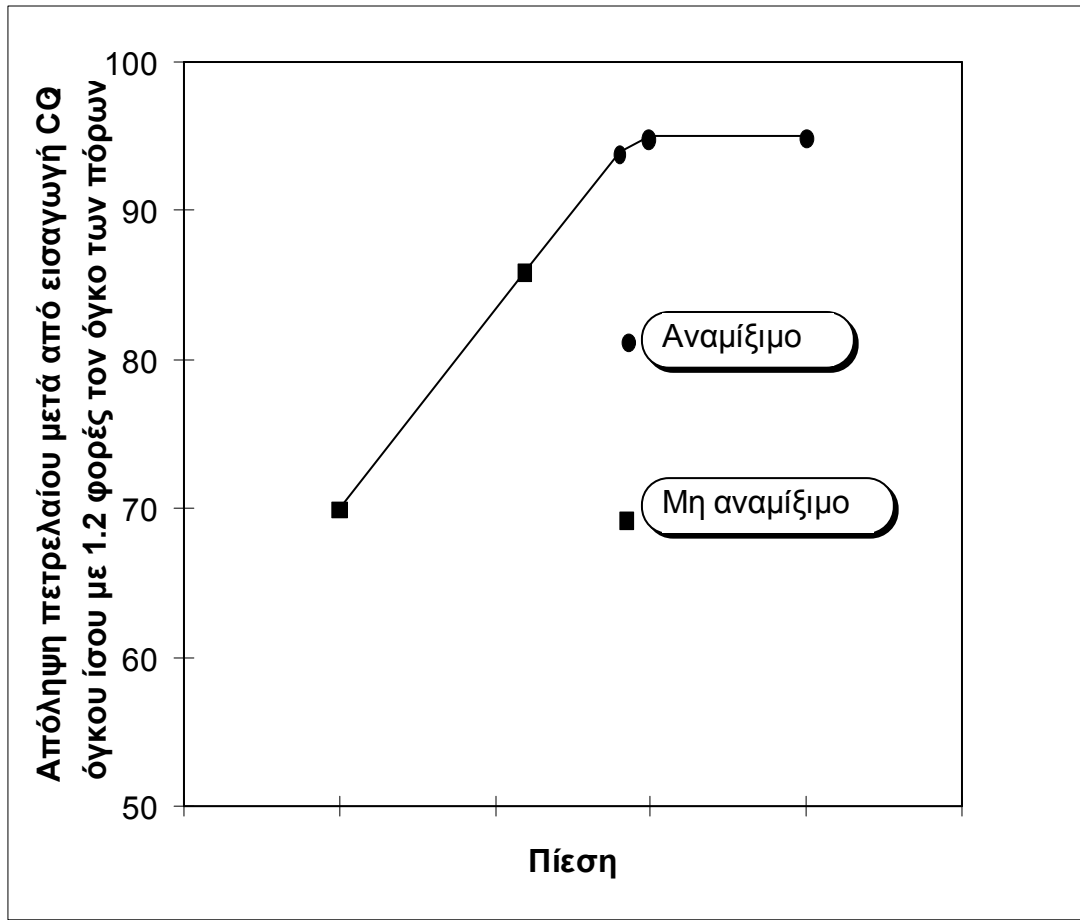


Σχήμα 6.1
Συσκευή λεπτού σωλήνα

Στο σχήμα 6.1 φαίνεται η συσκευή λεπτού σωλήνα (slim tube) που έχει προταθεί από τους Yellig & Metcalfe⁵⁰ για πειράματα ανάμιξης. Αποτελείται από ένα σωλήνα μήκους 40 ποδών και διαμέτρου 1/4 της ίντσας. Ο σωλήνας είναι κατασκευασμένος από ανοξείδωτο ατσάλι και έχει πληρωθεί με άμμο πάχους 160 με 200 mesh. Για κάθε πείραμα, ο σωλήνας γίνεται κορεσμένος σε πετρέλαιο, στη θερμοκρασία και πίεση που επιθυμείται. Ο κύλινδρος τροφοδοσίας γεμίζεται από ρευστό εισπίεσης στις συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας του πειράματος. Κατόπιν, το ρευστό εισπίεσης προωθείται από ένα πιστόνι με ταχύτητα 40 ποδών/ημέρα (ft/D), μέχρι να εισπιαστεί όγκος της τάξης του 70% του όγκου των πόρων και κατόπιν αυξάνεται η ταχύτητα εισπίεσης σε 80 πόδια/ημέρα (ft/D)..

Το ρευστό που απορρέει από το λεπτό σωλήνα, περνά από το οπτικό κελί για οπτική παρατήρηση και καταλήγει στον ρυθμιστή πίεσης (backpressure regulator), ο οποίος κρατά σταθερή την πίεση του πειράματος. Το υγρό που περνά από το ρυθμιστή πίεσης καταλήγει και μετράται σε βαθμονομημένο γυάλινο δοχείο, ενώ το αέριο καταλήγει σε μετρητή αερίου. Η οπτική παρατήρηση, καθώς και η αποληψιμότητα του πετρελαίου στα πειράματα με χρήση λεπτού σωλήνα, δίνουν αξιόπιστα αποτελέσματα για την περιγραφή της διαδικασίας ανάμιξης και τον υπολογισμό της ελάχιστης πίεσης ανάμιξης.

Η επεξήγηση των αποτελεσμάτων των πειραμάτων λεπτού σωλήνα δεν είναι απλή. Για παράδειγμα, ένα συγκεκριμένο ποσοστό απόληψης πετρελαίου, δεν είναι πάντα σωστό κριτήριο για να θεωρηθεί ότι συνέβη ανάμιξη. Αντίθετα, ικανό κριτήριο για την ύπαρξη αναμίξιμης μετατόπισης, είναι η αλλαγή κλίσης στην καμπύλη πίεσης-απόληψης πετρελαίου, για εισπίεση ρευστού με όγκο 1,2 φορές τον όγκο των πόρων. Οι πιέσεις πάνω από το σημείο αλλαγής της κλίσης είναι ικανές να δημιουργήσουν αναμίξιμη εκτόπιση μεταξύ των ρευστών. Η καμπύλη εμφανίζεται στο σχήμα 6.2.



Σχήμα 6.2

Αποτελέσματα πειραμάτων λεπτού σωλήνα και πρόβλεψη ελάχιστης πίεσης ανάμιξης.

Στο σημείο αλλαγής της κλίσης της καμπύλης η απόληψη του πετρελαίου είναι συνήθως της τάξης του 90% με 95%.

6.2 Εργαστηριακή προσομοίωση της διαδικασίας ανάμιξης με χρήση κελιού PVT με παράθυρο (PVT windowed-cell)

Η οπτική παρατήρηση σε οπτικά κελία είναι χρήσιμη για τη διαπίστωση της αναμιξιμότητας, κυρίως στην περίπτωση ανάμιξης με μηχανισμό εξάτμισης και ανάμιξης με χρήση CO_2 .

Η αναμιξιμότητα μεταξύ του ρευστού εισπίεσης και του πετρελαίου θα έχει επιτευχθεί, όταν εντός του οπτικού κελίου θα εμφανίζεται μία μόνο φάση, μιας και η μεταβατική ζώνη που θα έχει σχηματιστεί, θα ξεκινά από τη σύσταση του πετρελαίου

και θα καταλήγει στη σύσταση του αερίου. Το παραπάνω φαινόμενο παρατηρείται, όταν η πίεση διεξαγωγής του πειράματος είναι μεγαλύτερη από την ελάχιστη πίεση ανάμιξης.

Οι Henry και Mercalke⁵¹ παρατήρησαν σε οπτικό κελίο ότι κατά την εισπίεση CO₂ σε δείγμα πετρελαίου, το πετρέλαιο αλλάζει χρώμα σταδιακά και από μαύρο γίνεται πορτοκαλί με την αύξηση της περιεκτικότητας σε CO₂. Το πετρέλαιο χωρίζεται αρχικά σε δύο μέρη όπου, το πάνω έχει ανοιχτό πορτοκαλί χρώμα, ενώ το κάτω σκούρο πορτοκαλί. Κατόπιν, εμφανίζεται φυσαλίδα στο πάνω μέρος του κελιού, της οποίας το μέγεθος αυξάνει σταδιακά μέχρι ενός σημείου, όπου και σχηματίζεται διεπιφάνεια μεταξύ του αερίου, που είναι διαφανές και του πετρελαίου, που παρουσιάζεται με χρώμα μαύρο. Η δημιουργία της διεπιφάνειας υποδηλώνει την μη επίτευξη της ανάμιξης.

Στην περίπτωση επιτυχούς ανάμιξης των ρευστών, οι παρατηρήσεις στο οπτικό κελί είναι ίδιες, με τη διαφορά ότι σε κανένα στάδιο της διαδικασίας ανάμιξης δεν εμφανίζεται φυσαλίδα αερίου.

6.3 Μαθηματική προσομοίωση της ισορροπίας των φάσεων με χρήση καταστατικών εξισώσεων και συντελεστών ισορροπίας

Έχουν χρησιμοποιηθεί διάφορες μέθοδοι για την πρόβλεψη των συνθηκών ανάμιξης.

Πρώτοι οι Benham, Dowden και Kunzman¹⁰ το 1960 εμφάνισαν μια μέθοδο για τον υπολογισμό του βέλτιστου ποσοστού ανάμιξης ενδιάμεσου MB υδρογονανθράκων με μεθάνιο, για το σχηματισμό ρευστού εισπίεσης, ώστε να δημιουργηθεί εκτόπιση με ανάμιξη στο χαμηλότερο κόστος. Βάσει των παρατηρήσεών τους δημιούργησαν συσχετισμούς (correlations) οι οποίοι, αποδείχθηκαν ιδιαίτερα χρήσιμοι και αξιόπιστοι σε μετέπειτα μελέτες, από άλλους ερευνητές.

Σήμερα, η πρόβλεψη της ανάμιξης και της συμπεριφοράς ενός κοιτάσματος πετρελαίου, το οποίο είναι υπό εκμετάλλευση με τη μέθοδο της εκτόπισης με ανάμιξη, γίνεται από υπολογιστικά προγράμματα προσομοίωσης, τα οποία υπολογίζουν την κίνηση και την παραγωγή των ρευστών του ταμειυτήρα.

Οι πληροφορίες που χρησιμοποιούν τα προγράμματα αυτά προέρχονται από τις αναλύσεις των δειγμάτων των υπογείων ρευστών και των πετρωμάτων, από τις γεωλογικές και γεωφυσικές μελέτες και περιγραφές, καθώς και από τα στοιχεία παραγωγής και πίεσης του κοιτάσματος.

Όλα τα παραπάνω δεδομένα περιγράφουν τις ιδιότητες των ρευστών και του πετρώματος, τη γεωλογική δομή του χώρου εκμετάλλευσης και τη ροή και παραγωγή των ρευστών στο χώρο αυτό. Αποτελούν τα δεδομένα εισαγωγής στα προγράμματα προσομοίωσης όπου εκεί, μετά από υπολογισμούς με τις εξισώσεις ροής, γίνεται η πρόβλεψη της κίνησης των ρευστών. Για τον υπολογισμό της ροής συνήθως χρησιμοποιούνται εξισώσεις πεπερασμένων διαφορών.

Κατά την εξέλιξη της εκμετάλλευσης, νέα στοιχεία συσσωρεύονται, με αποτέλεσμα η περιγραφή της στατικής και δυναμικής κατάστασης του ταμιευτήρα να είναι πιο ακριβής, πράγμα που οδηγεί και σε πιο ρεαλιστικές προβλέψεις.

Δύο είδη προγραμμάτων χρησιμοποιούνται συνήθως για τους υπολογισμούς ροής:

- α) Προσομοιωτές μαύρου πετρελαίου (Black Oil Simulators).
- β) Προσομοιωτές σύστασης (Compositional Simulators).

Κατά την προσομοίωση σύστασης (compositional simulation), το πετρέλαιο και το αέριο περιγράφονται από μίγματα πολλών συστατικών. Η κίνηση του κάθε συστατικού από μια θέση του ταμιευτήρα σε μια άλλη υπολογίζεται από εξισώσεις ροής οι οποίες λαμβάνουν υπ' όψιν τον όγκο, τη μάζα και το μοριακό κλάσμα (mole %) που είχε το συστατικό στην προηγούμενη θέση για κάθε φάση που αυτό εμφανίζεται⁵². Η σύσταση ισορροπίας των φάσεων για τα συστατικά που βρίσκονται σε κάθε θέση του ταμιευτήρα (grid block), προσδιορίζεται από υπολογισμούς εκτόνωσης (flash calculations) χρησιμοποιώντας συντελεστές ισορροπίας K (K-Values) ή/και επιλύοντας καταστατικές εξισώσεις (Equations Of State) σε συνθήκες θερμοδυναμικής ισορροπίας ίσης πτητικότητας για κάθε φάση του ίδιου συστατικού.

Στους προσομοιωτές μαύρου πετρελαίου υπολογίζεται η κίνηση της αέριας και της υγρής φάσης χωρίς να υπολογίζεται η ροή του κάθε συστατικού ξεχωριστά. Στην περίπτωση της εκτόπισης με ανάμιξη χρησιμοποιούνται τροποποιημένες μορφές προσομοίωσης μαύρου πετρελαίου, στις οποίες οι κίνηση των φάσεων μεταξύ των διακριτών θέσεων του ταμιευτήρα (grid blocks) υπολογίζεται με τη βοήθεια εξισώσεων που περιλαμβάνουν την διαπερατότητα και την τριχοειδή πίεση, για την πιο αποτελεσματική αναπαράσταση του φαινομένου.

Πιο αποτελεσματική προσομοίωση και πρόβλεψη της ανάμιξης γίνεται από τους προσομοιωτές σύστασης (compositional simulations) και η αξιοπιστία τους είναι ανάλογη με την αξιοπιστία των δεδομένων εισαγωγής τους, των αριθμό των διακριτών θέσεων ταμιευτήρα (grid blocks) στον οποίο χωρίζεται ο ταμιευτήρας και την ικανότητα

του μαθηματικού μοντέλου, που χρησιμοποιείται από τον προσομοιωτή, να υπολογίζει την ισορροπία των φάσεων κοντά στο κρίσιμο σημείο.

Και στις δύο περιπτώσεις προσομοίωσης (σύστασης - μαύρου πετρελαίου) χρησιμοποιείται η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών για τον υπολογισμό των φυσικών διεργασιών που λαμβάνουν χώρα στον ταμιευτήρα. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται για την εύρεση των παραγώγων των διαφορικών εξισώσεων ροής. Οι εξισώσεις των πεπερασμένων διαφορών επιλύονται με την βοήθεια αριθμητικών μεθόδων μέσω υπολογιστών. Ο ταμιευτήρας χωρίζεται σε διακριτά μέρη (grid blocks) και υπολογίζεται η μεταφορά μάζας του κάθε συστατικού ή της κάθε φάσης από μία θέση του ταμιευτήρα σε γειτονική.

Ο υπολογισμός της ισορροπίας των φάσεων για την περίπτωση της εκτόπισης με ανάμιξη είναι πιο δύσκολος από ότι στην περίπτωση της μη αναμίξιμης εκτόπισης. Αυτό συμβαίνει διότι οι υπολογισμοί της ισορροπίας των φάσεων αντιμετωπίζουν προβλήματα στην περιοχή κοντά στο κρίσιμο σημείο.

Η συνήθης πρακτική που χρησιμοποιείται για τη βελτίωση της ακρίβειας στους υπολογισμούς αυτούς είναι η ρύθμιση (calibration) των εξισώσεων και των συσχετισμών (αλλάζοντας τις σταθερές στις εξισώσεις και στους συσχετισμούς), ώστε τα αποτελέσματα των προσομοιωτών να συμπίπτουν με τα αποτελέσματα που προκύπτουν από πειράματα λεπτού σωλήνα (slim tube displacement tests).

Η ακρίβεια του υπολογισμού της ισορροπίας των φάσεων κοντά στο κρίσιμο σημείο έχει αυξηθεί σταδιακά, από τότε που χρησιμοποιούνται προσομοιωτές σύστασης και συνεχώς αυξάνεται.

Ορισμένοι μελετητές με εργασίες τους^{48,53} έχουν δείξει αυξημένη ακρίβεια κατά τον υπολογισμό της ισορροπίας των φάσεων με καταστατικές εξισώσεις (EOS), δίνοντας ενθαρρυντικά δείγματα για τον υπολογισμό της ανάμιξης κατά την διαδικασία της αναμίξιμης μετατόπισης.

Στη βιβλιογραφία υπάρχουν μελέτες στις οποίες, ο υπολογισμός της ισορροπίας των φάσεων και κατ' επέκταση ο υπολογισμός της ελάχιστης πίεσης ανάμιξης (MMP) γίνεται με τη βοήθεια των καταστατικών εξισώσεων των Peng-Robinson^{54,55,56} ή των Soave-Redlich-Kwong⁵⁷.

7. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΕΛΑΧΙΣΤΗΣ ΠΙΕΣΗΣ ΑΝΑΜΙΞΗΣ ΜΕ ΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ MMP

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι ο υπολογισμός της ελάχιστης πίεσης ανάμιξης μεταξύ ρευστού ταμιευτήρα και ρευστού εισπίεσης, ώστε να προσδιοριστούν οι βέλτιστες οικονομικά συνθήκες παραγωγής του πετρελαίου με αναμίξιμη εκτόπιση με τον μηχανισμό της συμπύκνωσης (Condensing Gas Drive). Για το σκοπό αυτό δημιουργήθηκε πρόγραμμα σε γλώσσα FORTRAN 77, το οποίο ονομάστηκε MMP.

Τα στάδια που ακολουθούνται από το πρόγραμμα MMP είναι τα εξής:

- * Εισαγωγή δεδομένων στο πρόγραμμα (συστάσεις ρευστών, θερμοκρασία ταμιευτήρα).
- * Ορισμός αρχικής πίεσης πειράματος.
- * Προσδιορισμός διφασικού μίγματος.
- * Διαδοχικές εκτονώσεις των μιγμάτων που σχηματίζονται.
- * Αυξομειώσεις της πίεσης του πειράματος και καθορισμός άνω και κάτω ορίων για την τιμή της ελάχιστης πίεσης ανάμιξης.
- * Εύρεση της ελάχιστης πίεσης ανάμιξης.

Στο πρόγραμμα MMP εισάγονται αρχικά οι συστάσεις των δύο ρευστών που πρόκειται να αναμιχθούν και η θερμοκρασία του ταμιευτήρα. Το πρόγραμμα δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να αποθηκεύσει σε αρχεία τις συστάσεις των ρευστών ταμιευτήρα και εισπίεσης, έτσι ώστε να μη χρειαστεί να τα πληκτρολογήσει ξανά.

Κατόπιν, επιλέγεται η αρχική πίεση του πειράματος. Για την επιλογή αυτή προσδιορίζεται η πίεση βρασμού του ρευστού του ταμιευτήρα, η οποία αυξανόμενη 10 psi επιλέγεται ως αρχική πίεση του πειράματος. Δε γίνεται διερεύνηση από το πρόγραμμα MMP για πιέσεις μικρότερες του σημείου βρασμού του ταμιευτήρα, γιατί τότε το ρευστό του ταμιευτήρα είναι διφασικό και δεν είναι δυνατή η καθολική ανάμιξή του με το ρευστό εισπίεσης.

Στο επόμενο στάδιο, γίνεται διερεύνηση ώστε να προσδιοριστεί μίγμα των δύο ρευστών, το οποίο να βρίσκεται μέσα στη διφασική περιοχή. Το πρώτο μίγμα των ρευστών αποτελείται από 90% ρευστό ταμιευτήρα και 10% ρευστό εισπίεσης.

Ο έλεγχος για τη διαπίστωση της διφασικής ή μη μορφής του μίγματος, γίνεται με τον προσδιορισμό του σημείου βρασμού του. Αν η πίεση του πειράματος είναι μεγαλύτερη από την πίεση βρασμού του μίγματος, τότε το μίγμα είναι μονοφασικό.

Ο υπολογισμός της πίεσης βρασμού του μίγματος βασίζεται στη μέθοδο που περιγράφεται στην εργασία του N. Βαρότση⁵⁸, με την οποία εξασφαλίζεται ταχύτατη και ικανοποιητικής ακρίβειας επίλυση.

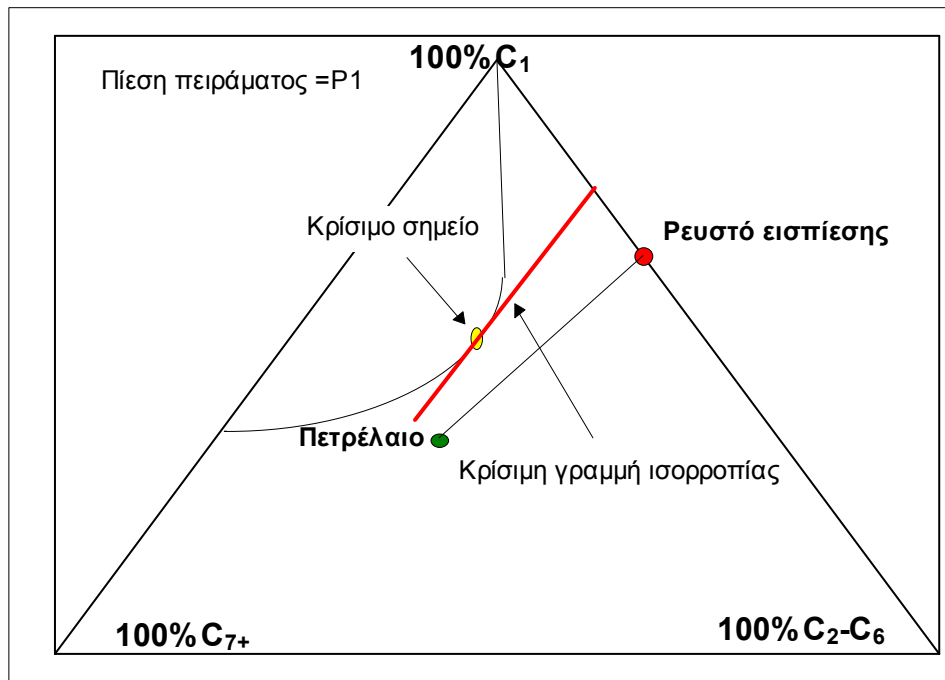
Αν το μίγμα είναι μονοφασικό, γίνεται αλλαγή στη σύστασή του. Το ποσοστό που αναλογεί στο ρευστό του ταμιευτήρα μειώνεται κατά 10%, ενώ αυξάνεται κατά 10% το ποσοστό που αναλογεί στο ρευστό εισπίεσης. Γίνεται έλεγχος της μονοφασικότητας ή όχι του νέου μίγματος και αν εξακολουθεί να είναι μονοφασικό αλλάζει και πάλι η σύστασή του. Η διαδικασία συνεχίζεται έως ότου το μίγμα γίνει διφασικό. Αν αυτό δεν συμβεί ούτε στο τελευταίο στάδιο της διερεύνησης όπου το μίγμα αποτελείται από 10% ρευστό ταμιευτήρα και 90% ρευστό εισπίεσης, τότε τα ρευστά είναι απ' ευθείας αναμίξιμα σε αυτήν την πίεση.

Εφόσον τα ρευστά είναι απευθείας αναμίξιμα σε αυτήν την πίεση, το ίδιο θα ισχύει και για την πίεση του ταμιευτήρα, η οποία είναι μεγαλύτερη. Στην περίπτωση αυτή, το πρόγραμμα MMP δίνει σαν αποτέλεσμα, ότι πρόκειται για ανάμιξη πρώτης επαφής.

Στο σχήμα 7.1 φαίνεται ότι στην πίεση P1 τα ρευστά προς ανάμιξη (πετρέλαιο ή υγρή φάση σε ισορροπία και ρευστό εισπίεσης) είναι απ' ευθείας αναμίξιμα μεταξύ τους. Η γραμμή που ενώνει τις συστάσεις τους, στο ψευδοτριαδικό διάγραμμα, δεν τέμνει την διφασική περιοχή οπότε δεν υπάρχει μίγμα τους σε διφασική ισορροπία.

Αν το μίγμα των ρευστών είναι διφασικό, τότε υπολογίζεται η ισορροπία των φάσεων (εκτόνωση - flash calculation) κατά την οποία δημιουργούνται υγρή και αέρια φάση σε ισορροπία.

Ο υπολογισμός της εκτόνωσης του μίγματος και των δύο φάσεων που προκύπτουν, γίνεται με τη μέθοδο που περιγράφεται στην προηγουμένως αναφερθείσα εργασία⁵⁸, όπου η σωστή επίλυση βασίζεται στη βελτιωμένη πρόβλεψη των τιμών για τους συντελεστές ισορροπίας των συστατικών για τις δύο φάσεις (K-Values).



Σχήμα 7.1

Πετρέλαιο και ρευστό εισπίεσης απευθείας αναμίξιμα στην πίεση P1.

Ορισμένες φορές ο υπολογισμός της εκτόνωσης είναι ανεπιτυχής, δίνοντας την τιμή 1 σε όλους τους συντελεστές ισορροπίας των συστατικών του μίγματος, ακόμα και αν προηγουμένως είχε φανεί ότι το μίγμα βρίσκεται σε διφασική περιοχή. Αυτό είναι αποτέλεσμα των μαθηματικών προβλημάτων που δημιουργούνται κατά την επίλυση των συστημάτων των καταστατικών εξισώσεων και συμβαίνει πιο συχνά κοντά στην περιοχή του κρίσιμου σημείου.

Το πρόβλημα αντιμετωπίζεται με την εκτέλεση μιας σειράς εκτονώσεων του μίγματος, στο οποίο παρουσιάζεται το πρόβλημα, αρχίζοντας από χαμηλότερες πιέσεις, όπου το μίγμα βρίσκεται μακριά από το κρίσιμο σημείο και φτάνοντας σταδιακά στην πίεση του πειράματος, χρησιμοποιώντας τους συντελεστές ισορροπίας (K-Values) της προηγούμενης εκτόνωσης σαν πρόβλεψη για αυτούς της επόμενης. Το βήμα αύξησης της πίεσης είναι μεγάλο αρχικά και με ρυθμό υποδιπλασιασμού, πλησιάζει στην πίεση του πειράματος. Οι συντελεστές ισορροπίας των συστατικών που προκύπτουν με αυτόν τον τρόπο, είναι πολύ κοντά σε αυτούς που προβλέπουν για το επόμενο βήμα (επόμενη εκτόνωση) με αποτέλεσμα την βελτιωμένη από άποψη αξιοπιστίας επίλυση των υπολογισμών εκτόνωσης. Μετά από αυτή τη διαδικασία, η εκτόνωση είναι συνήθως επιτυχής παρουσιάζοντας συντελεστές ισορροπίας συστατικών διαφορετικούς της

μονάδας. Αν ο υπολογισμός της εκτόνωσης αποτύχει και πάλι, το μίγμα κρίνεται μονοφασικό και το πείραμα αρχίζει από την αρχή με μειωμένη όμως πίεση.

Μετά από κάθε επιτυχή εκτόνωση, γίνεται έλεγχος των συντελεστών ισορροπίας, συγκρίνοντάς τους με αυτούς της προηγούμενης εκτόνωσης. Αν αυτοί είναι διαφορετικοί, πράγμα που σημαίνει ότι το ρευστό του ταμιευτήρα εξακολουθεί να εμπλουτίζεται με ελαφρά συστατικά από το ρευστό εισπίεσης, τότε η υγρή φάση που έχει δημιουργηθεί, αναμιγνύεται με το ρευστό εισπίεσης, σε αναλογία 90% υγρή φάση - 10% ρευστό εισπίεσης, για να εκτονωθεί εκ νέου.

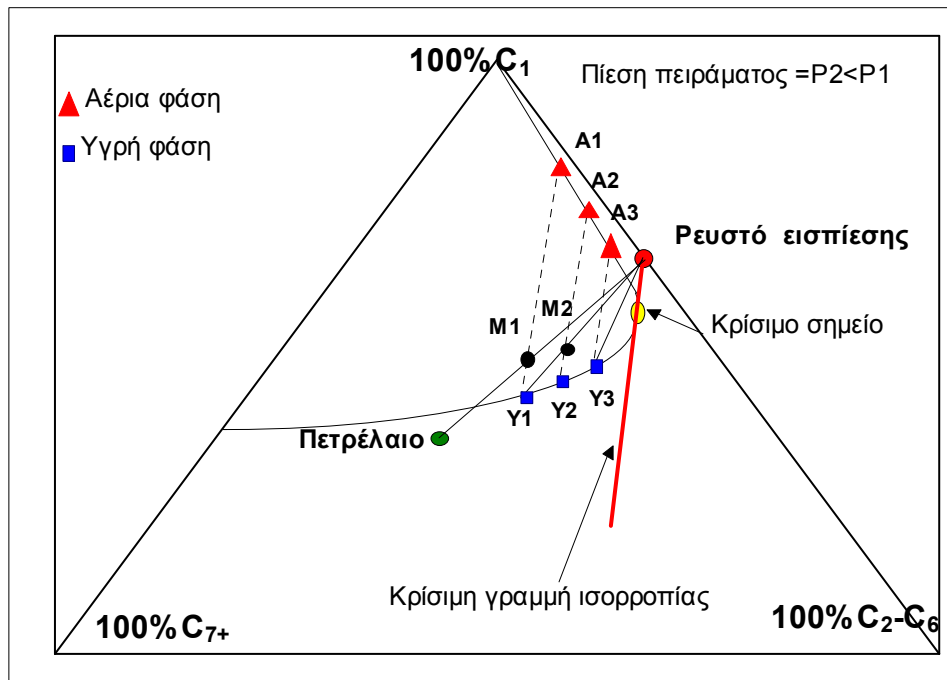
Η επιλογή αυτής της αναλογίας έχει γίνει ώστε το μίγμα των ρευστών να βρίσκεται πάντα κοντά στην καμπύλη βρασμού του φακέλου φάσεων, όπου τα μαθηματικά προβλήματα που παρουσιάζονται στον υπολογισμό της εκτόνωσης, να είναι λίγα σε σχέση με αυτά που παρουσιάζονται σε μίγματα που βρίσκονται κοντά στην καμπύλη δρόσου.

Οι συντελεστές ισορροπίας (K-Values) της προηγούμενης εκτόνωσης χρησιμοποιούνται ως πρόβλεψη για τους συντελεστές ισορροπίας της επόμενης, η οποία γίνεται χωρίς έλεγχο διφασικής περιοχής με προσδιορισμό του σημείου βρασμού. Έτσι, βελτιώνεται σημαντικά η ταχύτητα επίλυσης του προβλήματος, χωρίς να υστερεί σε ακρίβεια, μιας και οι συντελεστές ισορροπίας που χρησιμοποιούνται ως πρόβλεψη, θεωρούνται αξιόπιστοι και πολύ κοντά σε αυτούς που προκύπτουν μετά την εκτόνωση.

Η διαδικασία επαναλαμβάνεται, έως ότου το μίγμα κριθεί μονοφασικό, πράγμα που συμβαίνει όταν το μίγμα που αποτελείται από την υγρή φάση σε ισορροπία και το ρευστό εισπίεσης, δεν εμφανίζεται διφασικό σε καμία αναλογία μίξης, οπότε ακολουθεί μείωση της πίεσης του πειράματος ή μέχρι οι συντελεστές ισορροπίας δύο διαδοχικών εκτονώσεων εμφανιστούν ίδιοι, πράγμα που σημαίνει ότι δεν υπάρχει περαιτέρω εμπλουτισμός της υγρής φάσης από το αέριο εισπίεσης, οπότε και ακολουθεί αύξηση της πίεσης του πειράματος.

Στο σχήμα 7.2 εμφανίζεται η διαδικασία των πολλαπλών επαφών που έγινε εφικτή μετά από μείωση της πίεσης P1 (Σχήμα 7.1) σε P2.

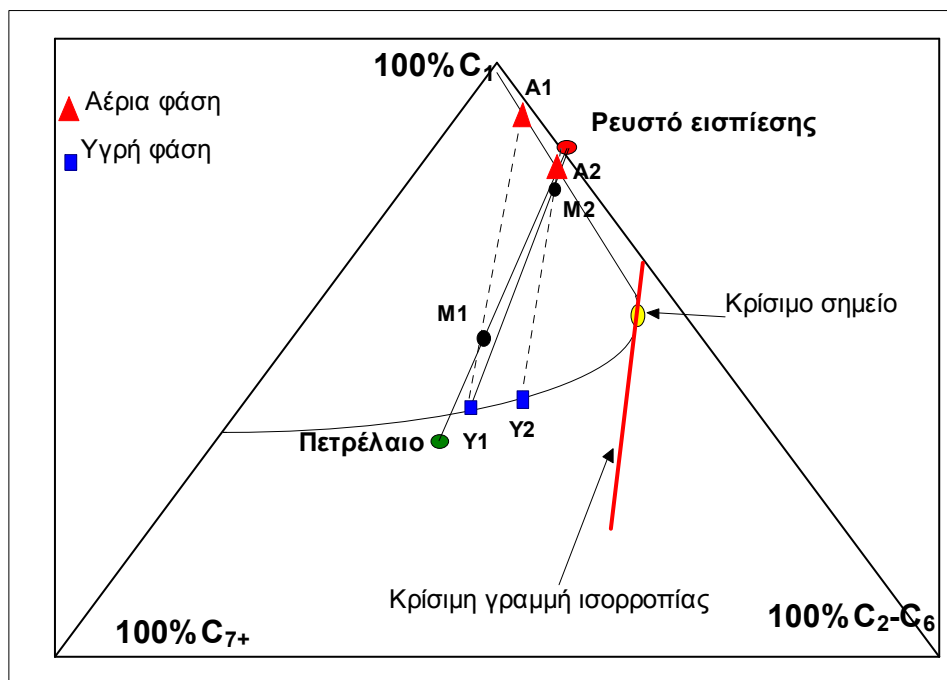
Στο σχήμα 7.3 φαίνεται να εμπλουτίζεται το πετρέλαιο από το ρευστό εισπίεσης με την δημιουργία της υγρής φάσης **Y1** και **Y2** μετά από εκτόνωση των μιγμάτων **M1** και **M2**. Ο εμπλουτισμός σταματά στην δημιουργία της υγρής φάσης **Y2** διότι, επιπλέον ανάμιξη με το αέριο εισπίεσης δίνει μίγμα του οποίου η σύσταση βρίσκεται πάνω στην γραμμή ισορροπίας (tie-line) του μίγματος **M2**.



Σχήμα 7.2

Πετρέλαιο και ρευστό εισπίεσης αναμίξιμα με την μέθοδο της συμπίκνωσης στην πίεση $P_2 < P_1$

Η αύξηση της πίεσης που ακολουθεί έχει σαν αποτέλεσμα την συρρίκνωση του φακέλου φάσεων και την μετατόπιση του κρίσιμου σημείου των μιγμάτων των ρευστών προς τα αριστερά του ψευδοτριαδικού διαγράμματος.



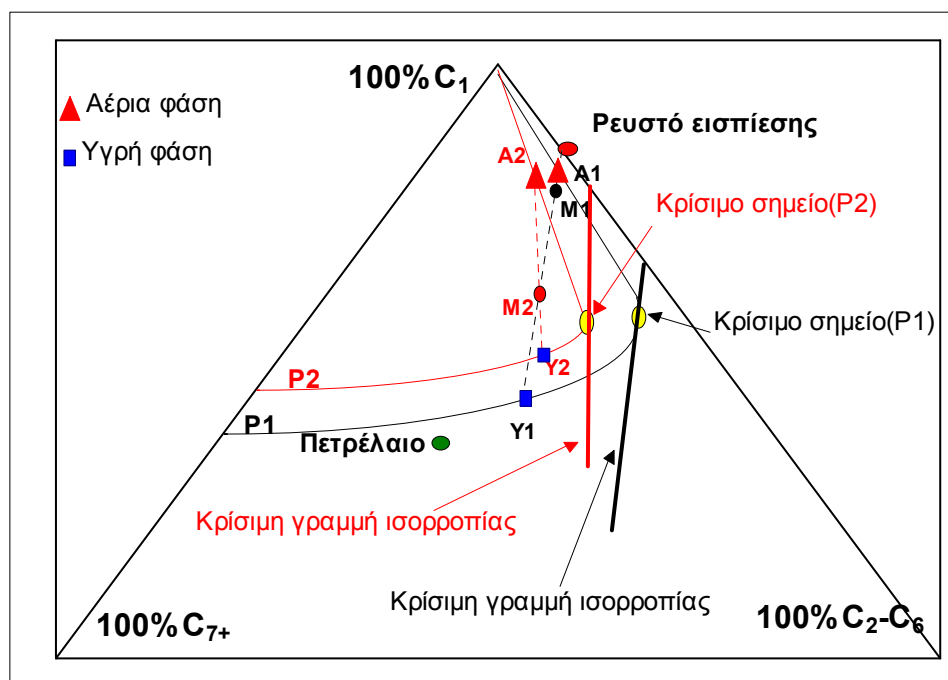
Σχήμα 7.3

Μερικός εμπλουτισμός του πετρελαίου από ρευστό εισπίεσης.

Μετά την αύξηση της πίεσης του πειράματος η διαδικασία αρχίζει από την αρχή με ανάμιξη των ρευστών ταμειυτήρα και εισπίεσης.

Στο σχήμα 7.4 φαίνεται η αλλαγή των φακέλων φάσεων που προκαλείται από την αλλαγή της πίεσης. Η πίεση P2 είναι μεγαλύτερη από την P1 και ο φάκελος φάσεων συρρικνώνεται προς τα αριστερά. Επίσης, το κρίσιμο σημείο στη νέα πίεση εμφανίζεται στο διάγραμμα αριστερά του κρίσιμου σημείου στην πίεση P1. Τα ρευστά που αναμιγνύονται είναι η υγρή φάση σε ισορροπία Y1, που προέκυψε από την τελευταία εκτόνωση στην πίεση P1 (αντί του πετρελαίου) και το ρευστό εισπίεσης. Μετά από κάθε αλλαγή πίεσης γίνεται διερεύνηση για διφασική περιοχή υπολογίζοντας το σημείο βρασμού του μίγματος. Στο σχήμα 7.4, το διφασικό μίγμα που ανιχνεύεται στη νέα πίεση P2 είναι το M2, το οποίο δίνει σε ισορροπία την υγρή φάση Y2 και την αέρια A2.

Οι διαδοχικές αυξομειώσεις της πίεσης του πειράματος ορίζουν άνω και κάτω όρια για την τιμή της. Όταν υπάρχει άνω και κάτω όριο για την τιμή της πίεσης, όταν δηλαδή κατά την διάρκεια του πειράματος η πίεση του ταμειυτήρα έχει αυξηθεί και μειωθεί τουλάχιστο μία φορά, η νέα πίεση που προκύπτει, όταν πρέπει να μειωθεί η πίεση του πειράματος, επιλέγεται με τη μέθοδο της διχοτόμησης.



Σχήμα 7.4

Αλλαγή πίεσης για αύξηση του εμπλουτισμού του πετρελαίου από το ρευστό εισπίεσης.

Η νέα πίεση έχει τιμή ίση με το μισό του αθροίσματος των ορίων $\{P = (P_{\max} + P_{\min})/2\}$. Κάθε φορά που η πίεση του πειράματος μειώνεται, το άνω όριο παίρνει τιμή ίση με την τιμή της προηγούμενης πίεσης. Ομοίως, κάθε φορά που η πίεση του πειράματος αυξάνεται, το κάτω όριο παίρνει την τιμή της προηγούμενης πίεσης.

Αν μετά από μια πτώση της πίεσης του πειράματος ακολουθήσει αύξηση τότε η νέα πίεση που προκύπτει είναι λίγο μεγαλύτερη από το άνω όριο. Αυτό συμβαίνει διότι μόνο το κάτω όριο θεωρείται αξιόπιστο ενώ για την αξιοπιστία του άνω ορίου γίνονται συνεχείς υπολογισμοί.

Η χρήση των ορίων της πίεσης και η χρήση της μεθόδου της διχοτόμησης για την επιλογή νέας πίεσης επιταχύνουν τη διαδικασία του πειράματος, περιορίζοντας το διάστημα μέσα στο οποίο βρίσκεται η λύση του προβλήματος υπολογισμού της ελάχιστης πίεσης ανάμιξης.

Οι διαδοχικές αυξομειώσεις της πίεσης του πειράματος φέρνουν ολοένα και πιο κοντά το άνω και κάτω όριο. Η τιμή της ελάχιστης πίεσης ανάμιξης είναι αυτή που προκύπτει όταν η διαφορά του άνω και κάτω ορίου πίεσης είναι μικρότερη από 3psi. Η διαφορά αυτή προκύπτει μετά από 8 μειώσεις της πίεσης άρα και του βήματος αύξησης ή μείωσης. Το βήμα έχει αρχικά την τιμή 300 και κατόπιν μειώνεται παίρνοντας τις τιμές 150 - 75 - 37.5 - 18.7 - 9.3 - 4.6 και 2.3.

Για τη διενέργεια όλων των παραπάνω υπολογισμών, έχουν παρθεί αυτούσιες ή μετά από κάποια μορφοποίηση υπορουτίνες από το πρόγραμμα **VALUE** που ανήκει στο Εργαστήριο Ανάλυσης Ρευστών και Πυρήνων Υπόγειων Ταμιευτήρων του Τμήματος Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του Πολυτεχνείου Κρήτης, στις οποίες έχει προστεθεί ένας αριθμός από νέες υπορουτίνες για τη δημιουργία του προγράμματος **MMP**.

Οι υπορουτίνες που έχουν δημιουργηθεί, είναι οι εξής:

Υπορουτίνα FWRITE

Υπορουτίνα APICON1

Υπορουτίνα MIXGASOIL

Υπορουτίνα MIXDIPHASIC

Υπορουτίνα ESTIMATION

Υπορουτίνα DPRE1

Υπορουτίνα CHANGEOIL

Υπορουτίνα STARTOIL

Υπορουτίνα TRIVTEST

Υπορουτίνα KVALPRE

Ο ρόλος τους μέσα στο πρόγραμμα, εμφανίζεται ως εξής:

7.1 Υπορουτίνα FWRITE

Η υπορουτίνα αυτή δίνει τη δυνατότητα στον χρήστη του προγράμματος **MMP** να καταγράψει σε αρχεία τις συστάσεις του ρευστού του ταμιευτήρα και του ρευστού εισπίεσης, έτσι ώστε να μη χρειαστεί ξανά η εισαγωγή δεδομένων σε περίπτωση που θα εκτελέσει το πρόγραμμα για τη ανάμιξη των ίδιων ρευστών κάτω από διαφορετικές συνθήκες θερμοκρασίας ταμιευτήρα.

7.2 Υπορουτίνα APICON1

Καταγράφει σε αρχείο τις συντεταγμένες των ρευστών ταμιευτήρα και εισπίεσης στο ψευδοτριαδικό διάγραμμα.

Τα αποτελέσματα του προγράμματος ελάχιστης πίεση ανάμιξης που εμφανίζονται στην οθόνη του υπολογιστή, αποθηκεύονται σε αρχεία, προκειμένου να δημιουργηθούν διαγράμματα που θα εμφανίζουν την εξέλιξη του πειράματος βήμα προς βήμα. Τα αποτελέσματα αυτά είναι:

- α) η πίεση του πειράματος μετά από κάθε υπολογισμό εκτόνωσης,
- β) οι συντεταγμένες στο ψευδοτριαδικό διάγραμμα της αέριας φάσης, της υγρής φάσης και του μίγματος των ρευστών μετά από κάθε εκτόνωση,
- γ) οι συντεταγμένες των ρευστών ταμιευτήρα και εισπίεσης στο ψευδοτριαδικό διάγραμμα και
- δ) οι συντελεστές ισορροπίας των συστατικών μετά από κάθε εκτόνωση.

Για τον υπολογισμό των συντεταγμένων των ρευστών στο ψευδοτριαδικό διάγραμμα γίνεται αρχικά ομαδοποίηση των συστατικών τους. Δημιουργούνται τρεις ομάδες C_1 , C_{2-C_6} και C_{7+} . Στην ομάδα C_1 κατατάσσονται το μεθάνιο, το άζωτο, το υδρογόλιο και το διοξείδιο του άνθρακα. Στην ομάδα C_{2-C_6} κατατάσσονται υδρογονάνθρακες με αριθμό ατόμων από 2 έως 6 και στην ομάδα C_{7+} κατατάσσονται υδρογονάνθρακες με αριθμό ατόμων από 7 και άνω.

Οι συντεταγμένες για το κάθε ρευστό βγαίνουν από τους εξής τύπους:

$$x = \frac{1 - C_{7+} - (C_2 + C_6)}{2}$$

$$y = C_1 \bullet \sin 60$$

όπου C_1 , C_{2-C_6} , C_{7+} τα κλάσματα σύστασης των ρευστών ($C_1 + C_{2-C_6} + C_{7+} = 1$)

7.3 Υπορουτίνα MIXGASOIL

Διενεργεί την ανάμιξη του ρευστού του ταμιευτήρα με το ρευστό εισπίεσης στο πρώτο βήμα ή την ανάμιξη της υγρής φάσης σε ισορροπία με το ρευστό εισπίεσης στα μετέπειτα βήματα, δημιουργώντας ένα το νέο μίγμα προς εκτόνωση.

Προσθέτει δηλαδή τα συστατικά των ρευστών προς ανάμιξη στις αναλογίες που υποδεικνύονται κάθε φορά από το πρόγραμμα MMP.

7.4 Υπορουτίνα MIXDIPHASIC

Ελέγχει αν το μίγμα βρίσκεται στη διφασική ή στη μονοφασική περιοχή με κριτήριο την πίεση βρασμού του. Αν η πίεση βρασμού είναι μεγαλύτερη από την πίεση του πειράματος, τότε το μίγμα θεωρείται διφασικό και οδηγείται προς εκτόνωση. Αν η πίεση βρασμού του μίγματος των ρευστών είναι μικρότερη από την πίεση του πειράματος, διενεργείται ένας επιπλέον υπολογισμός σημείου βρασμού του μίγματος.

Κατασκευάζεται δηλαδή νέο μίγμα, το οποίο αποτελείται από υγρό σε ισορροπία με αναλογία κατά 2% μικρότερη και από ρευστό εισπίεσης με αναλογία κατά 2% μεγαλύτερη από ότι στο προηγούμενο μίγμα. Το νέο μίγμα αναμένεται να έχει πίεση βρασμού μικρότερη από αυτή του προηγούμενου μίγματος. Αν όμως παρουσιάσει πίεση βρασμού μεγαλύτερη από την πίεση του πειράματος, άρα και του προηγούμενου μίγματος, το μίγμα θεωρείται διφασικό.

Η διαδικασία αυτή ακολουθείται για την επιβεβαίωση της μονοφασικότητας του μίγματος και την αποφυγή πιθανού εσφαλμένου υπολογισμού που θα οδηγούσε σε μείωση της πίεσης του πειράματος, θέτοντας εσφαλμένο άνω όριο πίεσης για τον υπολογισμό της ελάχιστης πίεσης ανάμιξης. Στην περίπτωση που το μίγμα φανεί και πάλι μονοφασικό, τότε διενεργείται αλλαγή στην αναλογία των συστάσεων των ρευστών ανάμιξης. Τα νέα μίγματα που κατασκευάζονται πλησιάζουν όλο και πιο πολύ τη σύσταση του αερίου εισπίεσης δηλαδή το ποσοστό του ρευστού εισπίεσης στο μίγμα αυξάνεται κατά 10% ενώ μειώνεται κατά 10% το ποσοστό της υγρής φάσης σε ισορροπία σε κάθε βήμα της διαδικασίας. Αν το μίγμα δεν βρεθεί διφασικό σε κανένα σημείο αυτής την διαδικασίας, τότε τα ρευστά που αναμιγνύονται είναι απ' ευθείας αναμίξιμα μεταξύ τους. Κάτω από αυτές τις συνθήκες υποδεικνύεται από την υπορουτίνα MIXDIPHASIC η μείωση της πίεσης του πειράματος. Αν αυτό συμβεί στην αρχή του πειράματος όπου η πίεση είναι λίγο μεγαλύτερη από την πίεση βρασμού του

ταμιευτήρα τότε υποδεικνύεται από την υπορουτίνα ότι πρόκειται για ανάμιξη πρώτης επαφής.

7.5 Υπορουτίνα ESTIMATION

Βάσει των τιμών των συντελεστών ισορροπίας (K-Values) που έχουν προκύψει από την τελευταία εκτόνωση ελέγχεται αν το μίγμα είναι πράγματι διφασικό ή αν κατά τον υπολογισμό της εκτόνωσης έχουν παρουσιαστεί αριθμητικά σφάλματα (Trivial Solution) τα οποία επιτρέπουν μεν τον υπολογισμό της εκτόνωσης αλλά οδηγούν σε εσφαλμένες λύσεις. Συγκεκριμένα, αν όλες οι τιμές των συντελεστών ισορροπίας των συστατικών έχουν τιμή μεταξύ 1.1 και 0.9, τότε θεωρείται ότι πρόκειται για μαθηματικό σφάλμα (TRIVIAL SOLUTION) και δεν ανταποκρίνονται στην πραγματικότητα. Το μίγμα τότε θεωρείται ότι βρίσκεται στο κρίσιμο σημείο του, αλλά είναι μονοφασικό. Μετά από αυτόν τον έλεγχο το μίγμα χαρακτηρίζεται οριστικά μονοφασικό ή διφασικό.

7.6 Υπορουτίνα DPRE1

Στην υπορουτίνα αυτή αυξάνεται ή μειώνεται η πίεση του πειράματος, ανάλογα με τα μηνύματα που εισέρχονται από άλλες υπορουτίνες, υπό μορφή δεικτών. Συγκεκριμένα, εισέρχονται στην υπορουτίνα μεταβλητή (δείκτης), η οποία παίρνει τιμές 0 και 1 και αναγνωρίζονται ως εντολές για μείωση ή αύξηση της πίεσης του πειράματος. Επίσης τίθεται άνω και κάτω όριο πίεσης, μετά από κάθε μείωση και αύξηση της πίεσης αντίστοιχα και ελέγχεται αν η διαφορά των δύο ορίων είναι μικρότερη η όχι της ακρίβειας που απαιτείται για την εξεύρεση της ελάχιστης πίεσης ανάμιξης, οπότε και δίνει τέλος ή συνέχεια στην εκτέλεση του πειράματος.

7.7 Υπορουτίνα CHANGE OIL

Αντικαθιστά αρχικά τη σύσταση του πετρελαίου με τη σύσταση της υγρής φάσης σε ισορροπία που προέκυψε από την πρώτη επιτυχή εκτόνωση του μίγματος των ρευστών ταμιευτήρα και εισπίεσης και κατόπιν αντικαθιστά τη σύσταση της υγρής φάσης σε ισορροπία από την προηγούμενη εκτόνωση με την υγρή φάση που προκύπτει από την τελευταία εκτόνωση .

7.8 Υπορουτίνα START OIL

Αποθηκεύει σε πίνακα τη σύσταση του ρευστού του ταμιευτήρα και μετά από κάθε αλλαγή της πίεσης την εισάγει στη θέση του υγρού σε ισορροπία ώστε το ρευστό του ταμιευτήρα να αναμιχθεί κατόπιν με το ρευστό εισπίεσης.

7.9 Υπορουτίνα TRIVTEST

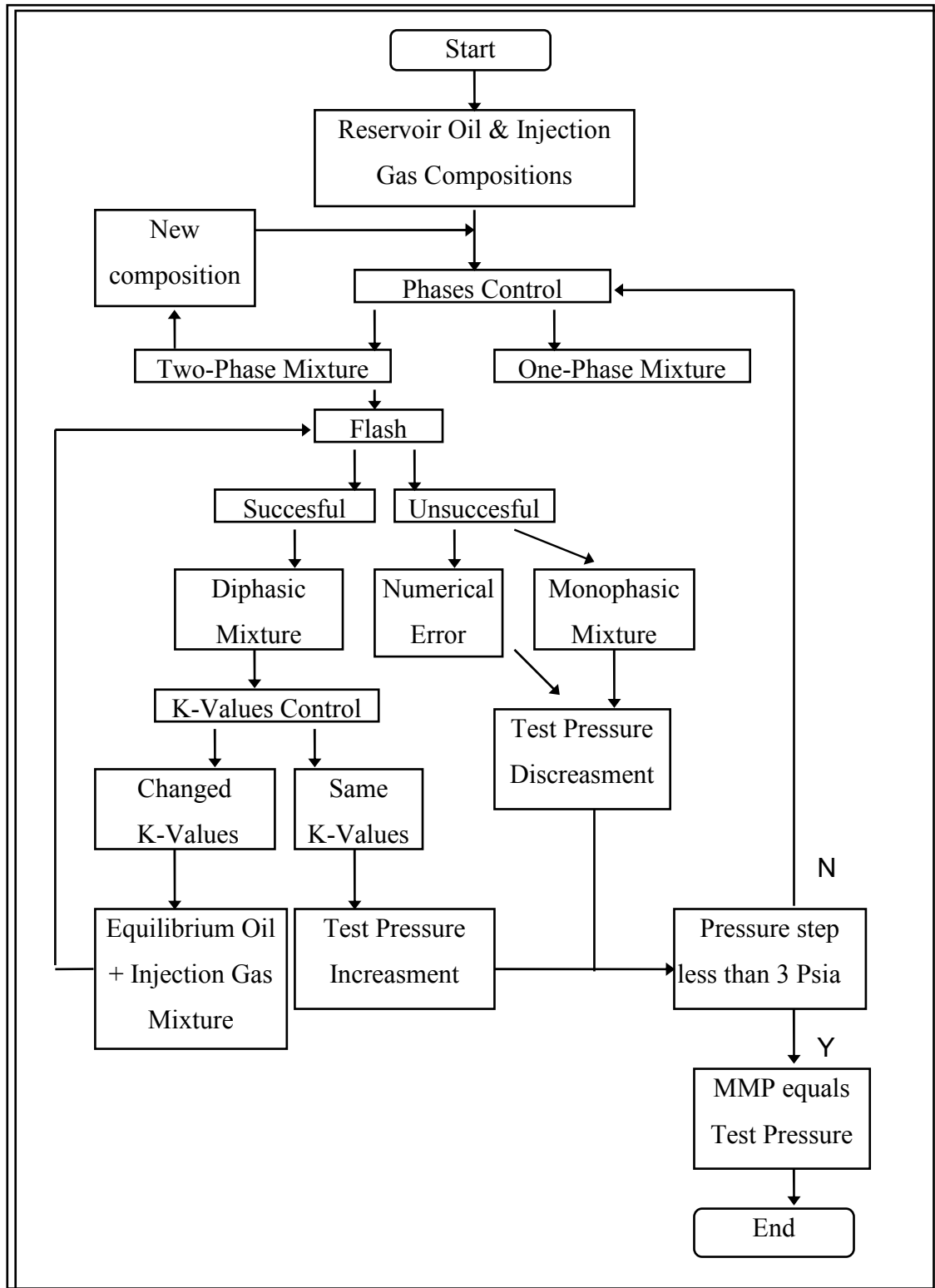
Ενεργοποιείται όταν εντοπισθεί αριθμητικό σφάλμα και ελέγχει για μια ακόμα φορά την διφασικότητα του μίγματος. Συγκεκριμένα, μειώνει την πίεση του πειράματος κατά 1000psi και κατόπιν υπολογίζει την εκτόνωση του μίγματος. Η πίεση αυτή φέρνει το μίγμα μακριά από το κρίσιμο σημείο και η εκτόνωση είναι σχεδόν πάντα επιτυχής. Μετά χρησιμοποιώντας ως πρόβλεψη τους συντελεστές ισορροπίας των συστατικών που υπολογίσθηκαν από την εκτόνωση, υπολογίζει νέα εκτόνωση του μίγματος σε πίεση 500 psi μικρότερη από την πίεση στην οποία είχε εμφανισθεί το μαθηματικό πρόβλημα. Το βήμα αύξησης της πίεσης υποδιπλασιάζεται κάθε φορά και μετά από 7 βήματα, υπολογίζεται η εκτόνωση του μίγματος, στην αρχική πίεση. Οι συντελεστές ισορροπίας που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της εκτόνωσης, είναι οι βέλτιστες προβλέψεις που μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Αν εντοπισθεί και πάλι αριθμητικό σφάλμα τότε το μίγμα κρίνεται οριστικά μονοφασικό.

7.10 Υπορουτίνα KVALPRE

Κάνει έλεγχο των συντελεστών ισορροπίας (K-Values) των συστατικών του μίγματος. Συγκρίνει τους συντελεστές ισορροπίας που προέκυψαν από την τελευταία εκτόνωση με αυτούς που προέκυψαν από την προτελευταία. Συγκεκριμένα ελέγχει αν όλοι οι συντελεστές ισορροπίας των συστατικών μεταξύ δύο διαδοχικών εκτονώσεων έχουν διαφορά μικρότερη από 0,1% οπότε και θεωρούνται ίδιοι. Αυτό σημαίνει ότι, ο εμπλουτισμός του πετρελαίου από ρευστό εισπίεσης έχει σταματήσει και μαζί με αυτόν και η διαδικασία της συμπύκνωσης. Για την συνέχιση και εξέλιξη του πειράματος θα πρέπει να αυξηθεί η πίεση. Σε περίπτωση όπου οι συντελεστές ισορροπίας είναι διαφορετικοί στα δύο αυτά διαδοχικά βήματα, ο εμπλουτισμός του υγρού σε ισορροπία από το ρευστό εισπίεσης συνεχίζεται και το νέο μίγμα οδηγείται στην εκτόνωση.

Στο σχήμα 7.5 φαίνεται το διάγραμμα ροής του προγράμματος MMP.

Στο παράρτημα Α εμφανίζονται οι υπορουτίνες που έχουν δημιουργηθεί για τις ανάγκες του προγράμματος MMP και αναφέρθηκαν παραπάνω.



Σχήμα 7.5

Διάγραμμα ροής του προγράμματος MMP

8. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ

Η πρόβλεψη της ελάχιστης πίεσης ανάμιξης με την υπολογιστική μέθοδο που παρουσιάζεται στην παρούσα εργασία εμφανίζεται αρκετά ακριβής. Τα αποτελέσματα της μεθόδου έχουν συγκριθεί με αποτελέσματα που προκύπτουν από δοκιμές λεπτού σωλήνα και με αυτά που προκύπτουν από άλλες υπολογιστικές μεθόδους.

Τα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν για την δοκιμή της μεθόδου έχουν προέλθει από δημοσιεύσεις σε περιοδικά διεθνούς κυκλοφορίας και από μη δημοσιευμένες εργασίες προερχόμενες από την βιομηχανία πετρελαίου. Η μέθοδος έχει εφαρμοσθεί στις εξής τέσσερις περιπτώσεις:

- * Σύστημα ανάμιξης ρευστών από δημοσιευμένη εργασία
- * Σύστημα ανάμιξης ρευστών από την πετρελαϊκή βιομηχανία (Μέση Ανατολή #1)
- * Σύστημα ανάμιξης ρευστών από την πετρελαϊκή βιομηχανία (Μέση Ανατολή #2)
- * Σύστημα ανάμιξης ρευστών από την πετρελαϊκή βιομηχανία (Ελλάδα)

Για την εκτέλεση του πειράματος σε όλες τις περιπτώσεις που αναφέρονται χρησιμοποιήθηκε ο ίδιος υπολογιστής, τα χαρακτηριστικά του οποίου είναι τα εξής :

Επεξεργαστής 486DX στα 100 MHz

Μνήμη RAM 16 MB

8.1 Σύστημα ανάμιξης ρευστών από δημοσιευμένη εργασία

Η δοκιμή του προγράμματος έχει βασιστεί σε στοιχεία από την εργασία του Kuo⁵⁴. Στην εργασία αυτή⁵⁴ η μέθοδος που ακολουθείται για τον προσδιορισμό της ελάχιστης πίεσης ανάμιξης βασίζεται στον υπολογισμό της ισορροπίας των φάσεων με την καταστατική εξίσωση των Peng - Robinson. Επιλέγεται μίγμα ρευστών ταμιευτήρα και εισπίεσης που να βρίσκεται στην διφασική περιοχή. Η εκτόνωση του μίγματος δίνει υγρή και αέρια φάση σε ισορροπία. Η υγρή φάση αναμιγνύεται με το ρευστό εισπίεσης και το νέο μίγμα εκτονώνεται. Η διαδικασία συνεχίζεται έως ότου η υγρή φάση να μην εμπλουτίζεται περισσότερο. Τότε αυξάνεται η πίεση και αρχίζει νέος κύκλος ανάμιξης ρευστών. Η διαδικασία τελειώνει όταν η υγρή και η αέρια φάση σε ισορροπία παρουσιάσουν ίδια σύσταση. Επίσης για τα ίδια ρευστά έχουν γίνει δοκιμές λεπτού σωλήνα και έχει προσδιορισθεί η ελάχιστη πίεση ανάμιξής τους. Η πρόβλεψη έχει γίνει και με την μέθοδο που παρουσιάζεται στην παρούσα εργασία.

Η ανάμιξη των δύο ρευστών έγινε σε δύο διαφορετικές θερμοκρασίες. Στην πρώτη δοκιμή η θερμοκρασία του ταμιευτήρα ήταν 170 F ενώ στην δεύτερη 206 F.

Το ρευστό του ταμιευτήρα που χρησιμοποιήθηκε έχει πίεση βρασμού 1875 psi στην θερμοκρασία των 170 F και 1990 psi στην θερμοκρασία των 206 F. Το μοριακό βάρος του κλάσματος C_{7+} είναι 215 και η πυκνότητά του είναι 0.851 γρ./κ.ε. Η σύσταση των ρευστών που αναμίχθηκαν παρουσιάζεται στον πίνακα 8.1. Στο σχήμα 8.1 αναπαρίσταται η διαδικασία της ανάμιξης των ρευστών σε ψευδοτριαδικό διάγραμμα. Η θερμοκρασία του ταμιευτήρα στο πείραμα που απεικονίζεται στο σχήμα 8.1 είναι 170 F.

ΣΥΣΤΑΤΙΚΟ	ΡΕΥΣΤΟ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΑ mole%	ΡΕΥΣΤΟ ΕΙΣΠΙΕΣΗΣ mole%
N ₂	0.130	0.260
CO ₂	0.390	0.450
H ₂ S	0.000	0.000
C ₁	32.520	52.880
C ₂	5.530	19.430
C ₃	4.250	13.110
I-C ₄	0.850	3.020
N-C ₄	2.910	4.680
I-C ₅	2.280	1.660
N-C ₅	1.390	1.510
C ₆	5.970	3.000
C ₇₊	43.780	0.000

Πίνακας 8.1

Συστάσεις των ρευστών ανάμιξης.

Τα δύο ρευστά δεν είναι απ'ευθείας αναμίξιμα μεταξύ τους στην αρχική πίεση του πειράματος (1884 psi). Η ευθεία που ενώνει τις συστάσεις των δύο ρευστών τέμνει το φάκελο φάσεων και με ανάμιξή τους δημιουργείται μίγμα που βρίσκεται μέσα στην διφασική περιοχή (μαύρος κύκλος). Εκτόνωση του μίγματος οδηγεί στην δημιουργία δύο φάσεων σε ισορροπία. Την υγρή (μπλε τετράγωνο) και την αέρια φάση (κόκκινο τρίγωνο).

Το ρευστό του ταμιευτήρα εμπλουτίζεται συνεχώς και τα σημεία απεικόνισης του μίγματος και των ρευστών ισορροπίας, που προκύπτουν από τις διαδοχικές εκτονώσεις

του μίγματος, εμφανίζονται όλο και πιο δεξιά στο ψευδοτριαδικό διάγραμμα. Σχηματίζεται με τον τρόπο αυτό ένα μέρος του φακέλου φάσεων των ρευστών που πλησιάζει προς το κρίσιμο σημείο.

Ο εμπλουτισμός του ρευστού του ταμιευτήρα σταματά όταν η προέκταση της γραμμής ισορροπίας, στην τελευταία εκτόνωση, τέμνει το σημείο της σύστασης του ρευστού εισπίεσης. Τότε η πίεση του πειράματος αυξάνεται, ο φάκελος φάσεων συρρικνώνεται προς τα αριστερά και προσδιορίζεται νέο διφασικό μίγμα. Ακολουθεί μια νέα σειρά εκτονώσεων προς το κρίσιμο σημείο για τη νέα πίεση. Διαδοχικές αυξήσεις και μειώσεις της πίεσης του πειράματος οριοθετούν την τιμή της ελάχιστης πίεσης ανάμιξης. Στο σχήμα 8.1 φαίνονται οι διαφορετικές ομάδες σημείων των ρευστών που έχουν προκύψει από αλλαγές των πιέσεων. Τέλος, όταν τα όρια πίεσης (άνω και κάτω) που έχουν τεθεί κατά την εξέλιξη του προγράμματος MMP αποκτήσουν διαφορά μικρότερη από την απαιτούμενη ακρίβεια (3 psi) εντοπίζεται η ελάχιστη πίεση ανάμιξης.

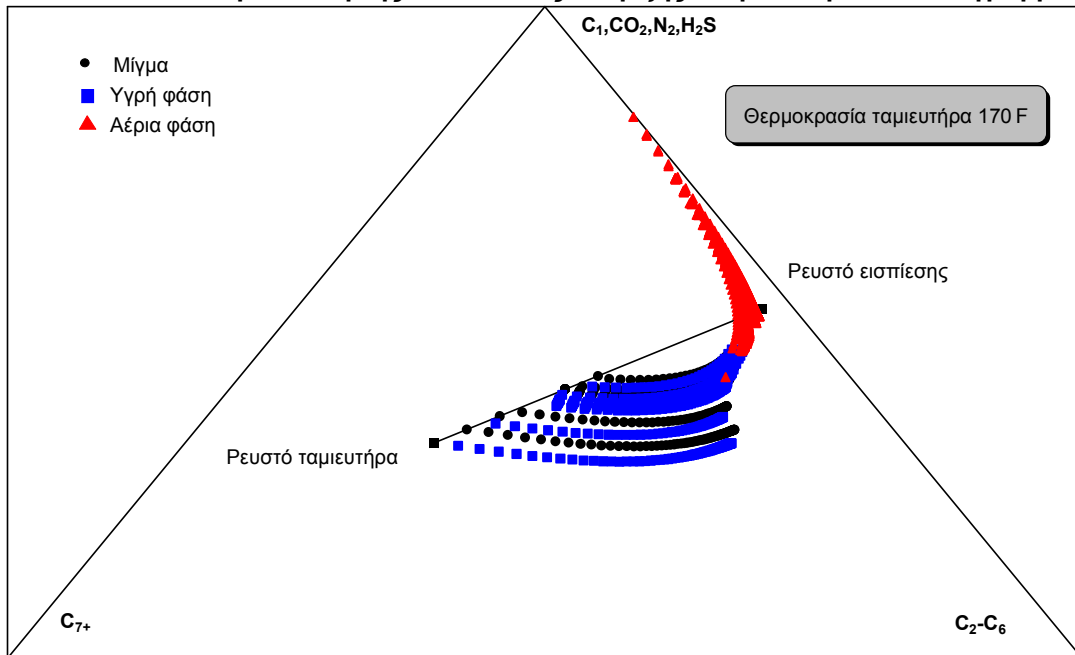
Η διαδικασία του υπολογισμού της ελάχιστης πίεσης ανάμιξης είχε διάρκεια περίπου 17 λεπτά. Για την εξεύρεση της τελικής λύσης χρειάστηκε να γίνουν 709 υπολογισμοί ισορροπίας φάσεων.

Στο σχήμα 8.2 εμφανίζονται οι τιμές που έλαβαν οι συντελεστές ισορροπίας των συστατικών κατά την εξέλιξη του πειράματος. Οι συντελεστές αυτοί συγκλίνουν σταδιακά στην τιμή ένα (1), όπου βρίσκεται το κρίσιμο σημείο και η λύση του προβλήματος εύρεσης της ελάχιστης πίεσης ανάμιξης.

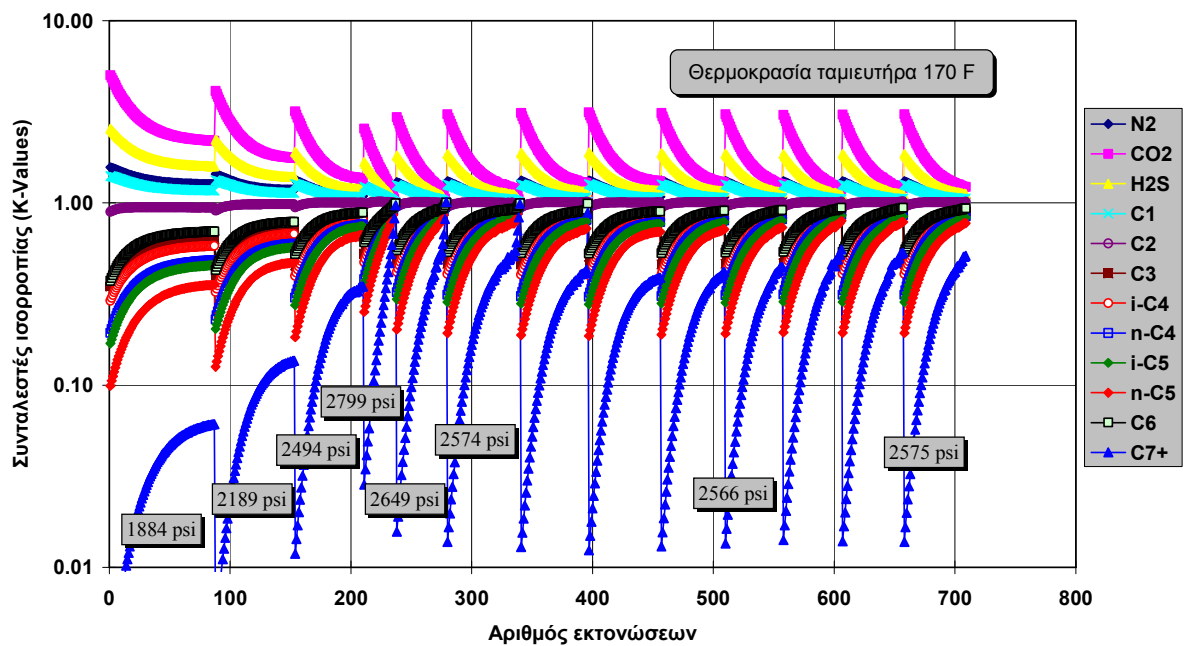
Οι τιμές των συντελεστών ισορροπίας που φαίνονται στο σχήμα 8.2 συγκλίνουν στην τιμή 1 σε περισσότερες από μία φορές. Αυτό συμβαίνει διότι κατά τη διάρκεια του πειράματος και κοντά στο κρίσιμο σημείο συχνά δημιουργούνται μαθηματικά προβλήματα που οδηγούν σε εσφαλμένες λύσεις (trivial solutions) ή διότι το μίγμα έχει περάσει στην μονοφασική περιοχή. Ο έλεγχος όμως αυτών των τιμών από το πρόγραμμα, όπως αναπτύχθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, τις αναγνωρίζει ως εσφαλμένες και η προσέγγιση στη λύση αρχίζει από νέο σημείο, συνήθως μετά από αλλαγή της πίεσης του πειράματος.

Το πείραμα εκτελέστηκε για μια ακόμα φορά με την ανάμιξη των ίδιων ρευστών αλλά κάτω από διαφορετική θερμοκρασία ταμιευτήρα. Η θερμοκρασία του ταμιευτήρα αυτή τη φορά ήταν 206 F.

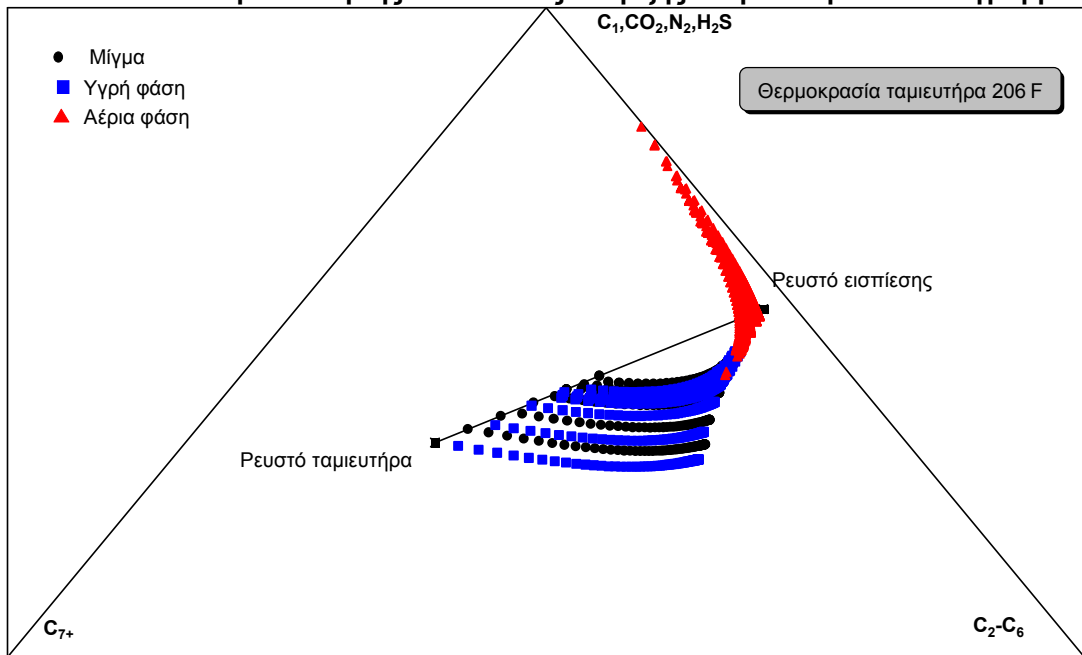
Σχήμα 8.1
Αναπαράσταση της διαδικασίας ανάμιξης σε ψευδοτριαδικό διάγραμμα



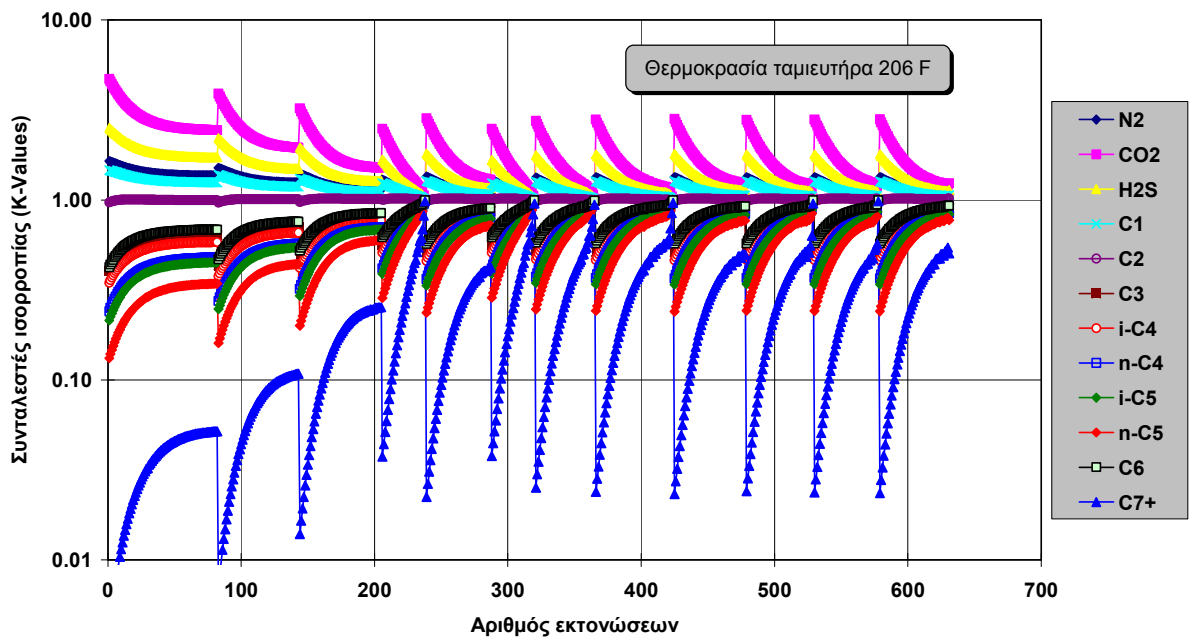
Σχήμα 8.2
Εξέλιξη των συντελεστών ισορροπίας κατά την διαδικασία της ανάμιξης



Σχήμα 8.3
Αναπαράσταση της διαδικασίας ανάμιξης σε ψευδοτριγωνικό διάγραμμα

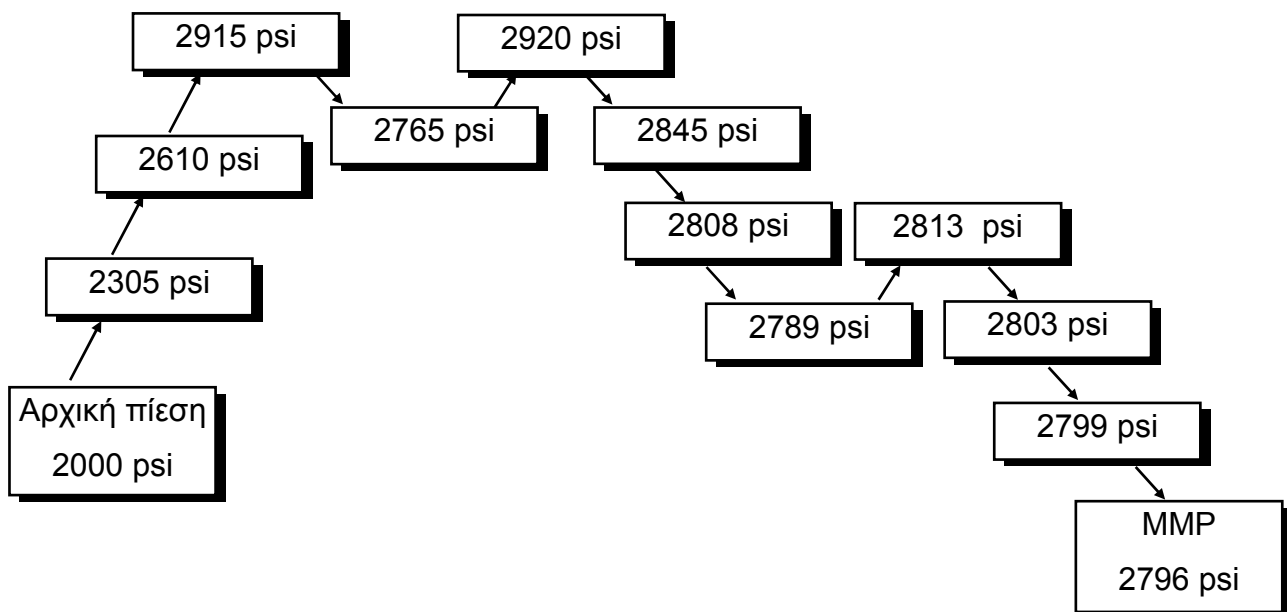


Σχήμα 8.4
Εξέλιξη των συντελεστών ισορροπίας κατά την διαδικασία της ανάμιξης



Στο σχήμα 8.3 απεικονίζεται η εξέλιξη του πειράματος ανάμιξης σε ψευδοτριαδικό διάγραμμα και φαίνεται σημαντική ομοιότητα με τη μορφή του διαγράμματος που προέκυψε από το πείραμα σε θερμοκρασία 170 F.

Στο σχήμα 8.4 εμφανίζονται οι τιμές των συντελεστών ισορροπίας των συστατικών κατά την εκτέλεση του πειράματος με θερμοκρασία ταμιευτήρα 206 F. Το διάγραμμα στο οποίο εμφανίζονται οι συντελεστές ισορροπίας των συστατικών του μίγματος κατά την διαδικασία της ανάμιξης στους 206 F έχει παρόμοια μορφή από αυτή στη θερμοκρασία των 170 F. Η πορεία των πιέσεων κατά την εκτέλεση του προγράμματος για θερμοκρασία 206 F φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα ροής.



Η πίεση του πειράματος ξεκινά από την τιμή των 2000 psi (λίγο μεγαλύτερη από την πίεση βρασμού του ταμιευτήρα) και μετά από αυξομειώσεις καταλήγει στην τιμή των 2796 psi η οποία αποτελεί την ελάχιστη πίεση ανάμιξης του πειράματος. Στην πιέσεις 2915, 2920, 2845, 2808, 2813, 2803 & 2799 psi το πρόγραμμα MMP ανιχνεύει μονοφασική περιοχή και μειώνεται η ενώ στις υπόλοιπες πιέσεις οι τιμές των συντελεστών ισορροπίας μένουν ίδιες μεταξύ δύο συνεχόμενων υπολογισμών ισορροπίας φάσεων (το πετρέλαιο δεν εμπλουτίζεται περισσότερο) και αυξάνεται η πίεση του πειράματος.

Το πείραμα ανάμιξης των ρευστών σε θερμοκρασία ταμιευτήρα 206 F χρειάστηκε για την ολοκλήρωσή του 16 περίπου λεπτά και 629 υπολογισμούς ισορροπίας φάσεων (flash calculations).

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τα δύο πειράματα, συγκρίθηκαν με αυτά από δοκιμές εισπίεσης σε λεπτό σωλήνα και με αυτά που προέκυψαν από την υπολογιστική μέθοδο του Κuo⁵⁴.

Οι συγκρίσεις εμφανίζονται στον πίνακα 8.2. Για θερμοκρασία ταμιευτήρα 170 F, η πρόβλεψη της ελάχιστης πίεσης ανάμιξης από τη μέθοδο που αναπτύχθηκε σε αυτήν την εργασία, απέχει 173 psi από τη μετρούμενη εργαστηριακή τιμή.

	Εργαστηριακή τιμή MMP (slim tube) (psi)	Προβλεπόμενη τιμή MMP από Κuo ⁵⁴ (psi)	Διαφορά (psi)	Προβλεπόμενη τιμή MMP από το πρόγραμμα MMP (psi)	Διαφορά (psi)
170 F	2400.00	2268.00	-132	2573	+173
206 F	2680.00	2638.00	-42	2796	+116
			Μέση Διαφορά 87		Μέση Διαφορά 145

Πίνακας 8.2

Σύγκριση αποτελεσμάτων μεθόδων προσδιορισμού και πρόβλεψης.

8.2 Σύστημα ανάμιξης ρευστών από την πετρελαϊκή βιομηχανία (Μέση Ανατολή #1)

Η μέθοδος που αναπτύχθηκε έχει χρησιμοποιηθεί σε αυτήν την περίπτωση για την πρόβλεψη της ελάχιστης πίεσης ανάμιξης σε σύστημα ρευστού ταμιευτήρα - ρευστού εισπίεσης που βρίσκεται στην Μέση Ανατολή.

Ο σκοπός της μελέτης των δεδομένων δεν ήταν μόνο ο υπολογισμός της ελάχιστης πίεσης ανάμιξης δύο ρευστών, αλλά και ο προσδιορισμός της σύστασης ρευστού εισπίεσης, ώστε αυτό να είναι αναμίξιμο με το ρευστό του ταμιευτήρα στις παρούσες συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας του ταμιευτήρα.

Η θερμοκρασία του ταμιευτήρα είναι 280 F και η πίεσή του 4565 psi. Η πίεση βρασμού του ταμιευτήρα είναι 4247 psi. Το μοριακό βάρος του κλάσματος C₇₊ είναι 175.6 και η πυκνότητά του είναι 0.811 γρ./κ.ε.

Τα αέρια για εισπίεση που βρίσκονταν διαθέσιμα στην περιοχή, ήταν το αέριο του διαχωριστήρα και το CO₂. Ανάμιξη του αερίου του διαχωριστήρα με το ρευστό του ταμιευτήρα δεν είναι εφικτή στις συνθήκες του ταμιευτήρα, σύμφωνα με τους υπολογισμούς της μεθόδου αυτής της εργασίας και σύμφωνα με τις εργαστηριακές μετρήσεις του προμηθευτή των δεδομένων, διότι η ελάχιστη πίεση ανάμιξης είναι κατά πολύ μεγαλύτερη από την πίεση του ταμιευτήρα.

Η ελάχιστη πίεση ανάμιξης υπολογιζόμενη από το πρόγραμμα είναι 5088 psi και από τις δοκιμές λεπτού σωλήνα 5020 psi. Η διαφορά είναι 68 psi.

Στον πίνακα 8.3 εμφανίζονται οι συστάσεις των ρευστών που έχουν αναμιχθεί και η υπολογιζόμενη από αυτή την εργασία ελάχιστη πίεση ανάμιξης για την κάθε περίπτωση.

Το ρευστό του ταμιευτήρα αναμιγνύεται στην πρώτη δοκιμή με το αέριο του διαχωριστήρα το οποίο ονομάζεται **αέριο 1**. Η ελάχιστη πίεση ανάμιξης υπολογίζεται σε 5088 psi. Η πίεση αυτή είναι κατά πολύ μεγαλύτερη από αυτή του ταμιευτήρα άρα και η ανάμιξη των ρευστών με συμπύκνωση κάτω από αυτές τις συνθήκες δεν θα είχε αποτέλεσμα.

Στο σχήμα 8.5 απεικονίζεται η εξέλιξη του πειράματος σε ψευδοτριαδικό διάγραμμα. Τα σημεία που απεικονίζουν τα μίγματα και τα ρευστά ισορροπίας στο διάγραμμα εμφανίζονται σχεδόν στην ίδια ευθεία. Αυτό συμβαίνει διότι η ευθεία που ενώνει τις συστάσεις των δύο αρχικών ρευστών (ταμιευτήρα και εισπίεσης) είναι πολύ κοντά και σχεδόν παράλληλη με την γραμμή ισορροπίας μέγιστου εμπλουτισμού, ενώ κατά την αλλαγή των πιέσεων ο φάκελος φάσεων μετακινείται παράλληλα με αποτέλεσμα και οι νέες γραμμές ισορροπίας μέγιστου εμπλουτισμού να είναι κοντά και σχεδόν παράλληλες με την ευθεία που ενώνει τις συστάσεις των δύο αρχικών ρευστών. Τα σημεία ισορροπίας εμφανίζονται στο διάγραμμα ολοένα και πιο κοντά, μέχρι να ενωθούν κοντά στο κρίσιμο σημείο. Εκεί προσδιορίζεται η ελάχιστη πίεση ανάμιξης.

Το πείραμα ανάμιξης του ρευστών του ταμιευτήρα με το ρευστό του διαχωριστήρα (αέριο 1) χρειάστηκε για την ολοκλήρωσή του 4 περίπου λεπτά και 109 υπολογισμούς ισορροπίας φάσεων (flash calculations).

Στο σχήμα 8.6 φαίνονται οι τιμές που παίρνουν οι συντελεστές ισορροπίας κατά την διαδικασία της ανάμιξης του ρευστού του ταμιευτήρα με το αέριο του διαχωριστήρα (αέριο 1).

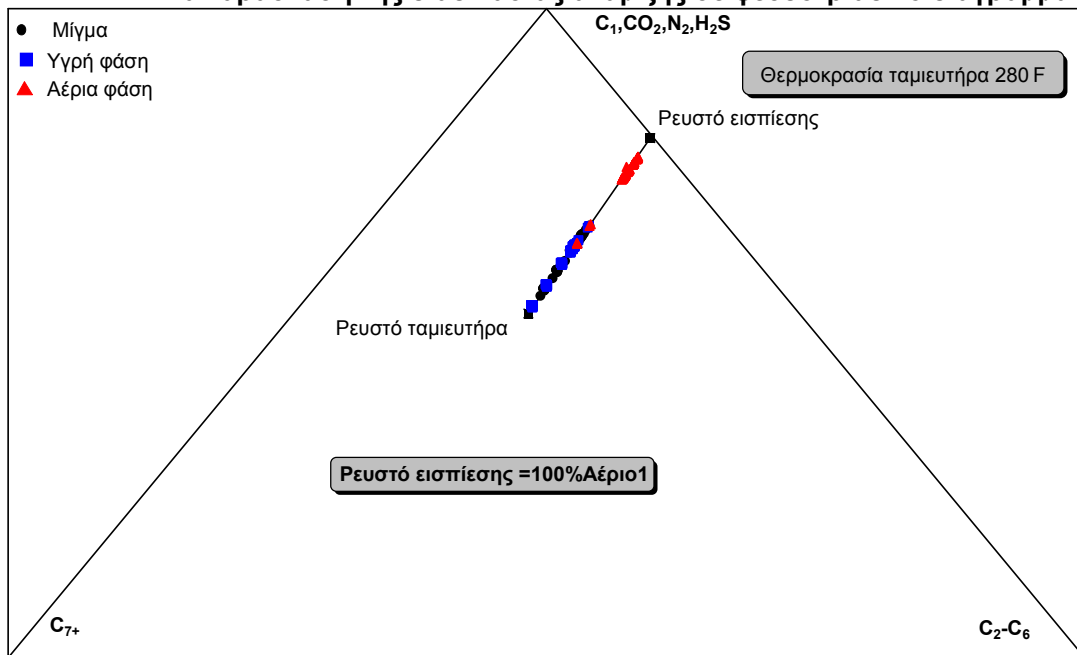
ΣΥΣΤ.	ΡΕΥΣΤΟ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΑ (mole%)	ΑΕΡΙΟ ΔΙΑΧΩΡΙΣΤ. ΑΕΡΙΟ-1 (mole%)	ΑΕΡΙΟ ΜΙΞΗΣ ΑΕΡΙΟ-2 (mole%)	90%ΑΕΡΙΟ1 10%ΑΕΡΙΟ2 (mole%)	80%ΑΕΡΙΟ1 20%ΑΕΡΙΟ2 (mole%)	70%ΑΕΡΙΟ1 30% ΑΕΡΙΟ2 (mole%)
N ₂	0.300	0.570	0.000	0.513	0.456	0.399
CO ₂	2.190	4.620	70.000	11.158	17.696	24.234
H ₂ S	0.110	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
C ₁	50.450	74.840	0.000	67.356	59.872	52.388
C ₂	8.650	10.240	0.000	9.216	8.192	7.168
C ₃	4.940	5.690	30.000	8.121	10.552	12.983
I-C ₄	1.180	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
N-C ₄	2.340	3.010	0.000	2.709	2.408	2.107
I-C ₅	1.110	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
N-C ₅	1.280	0.680	0.000	0.612	0.544	0.476
C ₆	2.290	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
C ₇₊	25.160	0.350	0.000	0.315	0.280	0.245
ΥΠΟΛΟΓΙΖΟΜΕΝΗ ΕΛΑΧΙΣΤΗ ΠΙΕΣΗ ΑΝΑΜΙΞΗΣ (psi)		5088		4947	4685	4431

Πίνακας 8.3

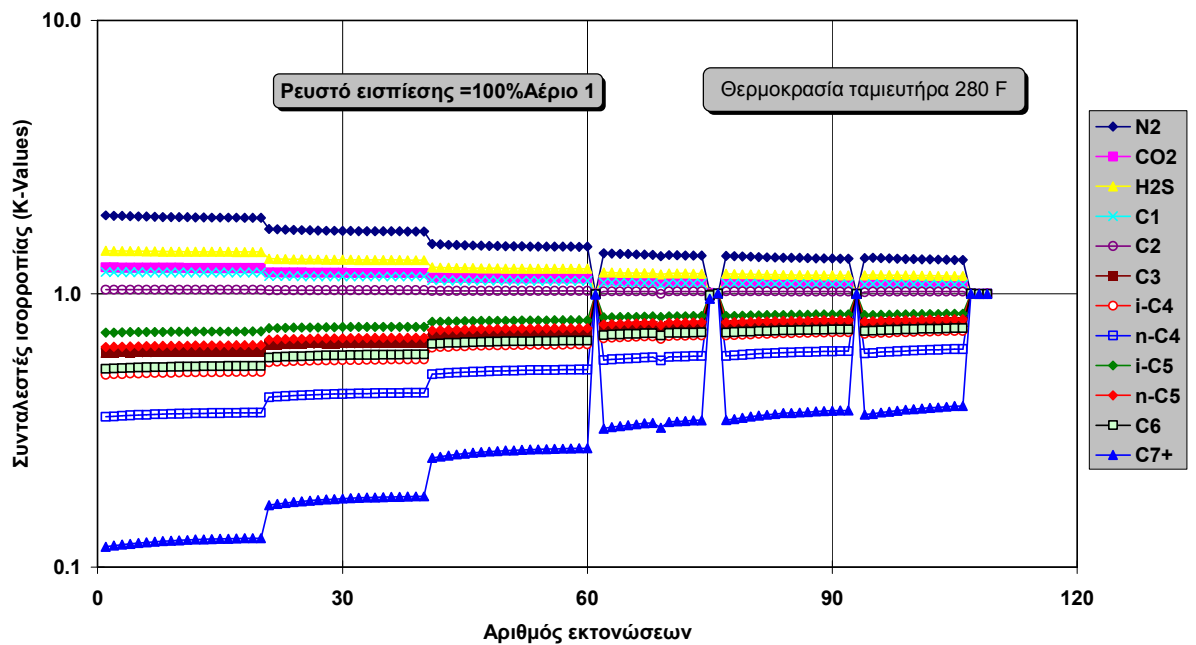
Συστάσεις ρευστών ανάμιξης

Με σκοπό την μείωση της απαιτούμενης ελάχιστης πίεσης ανάμιξης και την εφαρμογή της μεθόδου ανάμιξης με συμπύκνωση στον ταμιευτήρα σχηματίσθηκε ένα ρευστό που αποτελείται κατά 70% από CO₂ και κατά 30% από προπάνιο το οποίο ονομάσθηκε **αέριο 2**. Το CO₂ χρησιμοποιήθηκε διότι ήταν διαθέσιμο στην περιοχή και λόγω της καλής συμπεριφορά ανάμιξής του με υδρογονάνθρακες.

Σχήμα 8.5
Αναπαράσταση της διαδικασίας ανάμιξης σε ψευδοτριαδικό διάγραμμα



Σχήμα 8.6
Εξέλιξη των συντελεστών ισορροπίας κατά την διαδικασία της ανάμιξης



Το αέριο 1 ενώθηκε με το αέριο 2 σε διάφορες αναλογίες και τα μίγματά τους χρησιμοποιήθηκαν ως ρευστά εισπίεσης.

Αρχικά σχηματίσθηκε ρευστό εισπίεσης αποτελούμενο από **90% αέριο 1** και **10% αέριο 2**. Η ελάχιστη πίεση ανάμιξης που υπολογίστηκε για αυτό το ρευστό εισπίεσης είναι 4947 psi. Η πίεση αυτή είναι μεγαλύτερη από την πίεση του ταμιευτήρα οπότε δεν μπορεί το ρευστό εισπίεσης να χρησιμοποιηθεί για την αναμίξιμη μετατόπιση του ρευστού του ταμιευτήρα. Εντούτοις, η τιμή της ελάχιστης πίεσης ανάμιξης είναι σημαντικά πιο χαμηλή από την περίπτωση όπου το ρευστό εισπίεσης ήταν το αέριο 1. Η παρατήρηση αυτή οδηγεί στο συμπέρασμα ότι επιπλέον εμπλουτισμός του αερίου 1 από το αέριο 2 θα οδηγήσει στην δημιουργία ρευστού εισπίεσης που θα αναμιγνύεται με το ρευστό του ταμιευτήρα σε χαμηλότερη πίεση.

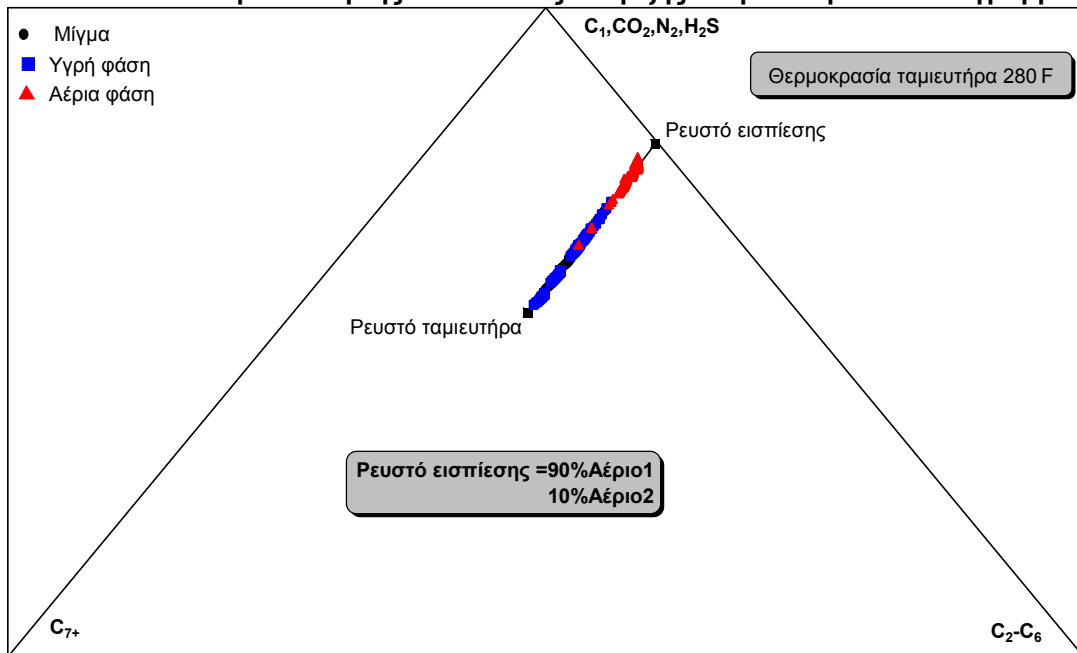
Το σχήμα 8.7, στο οποίο απεικονίζεται η διαδικασία ανάμιξης του ρευστού του ταμιευτήρα με ρευστό εισπίεσης που αποτελείται από 90% αέριο 1 και 10% αέριο 2, παρουσιάζει παρόμοια μορφή με το σχήμα 8.5 (αέριο 1 (100%) ως ρευστό εισπίεσης). Η διαφορά εδώ είναι ότι οι υγρές και αέριες φάσεις σε ισορροπία που προκύπτουν σχηματίζουν μέρος των φακέλων φάσεων και δεν βρίσκονται πάνω αλλά γύρω, κυρίως, από την ευθεία που ενώνει τις συστάσεις των αρχικών ρευστών. Η διαφορά αυτή προέκυψε λόγω της αλλαγής στη σύσταση του ρευστού εισπίεσης. Οι μετακινήσεις του φακέλου φάσεων λόγω των αυξομειώσεων της πίεσης δεν είναι πλέον παράλληλες με την ευθεία που ενώνει τις αρχικές συστάσεις.

Η εκτέλεση του προγράμματος MMP στην περίπτωση όπου το ρευστό εισπίεσης ήταν 90% αέριο 1 και 10% αέριο 2 είχε διάρκεια περίπου 5 λεπτά και διενεργήθηκαν 114 υπολογισμοί ισορροπίας φάσεων (Flash calculations).

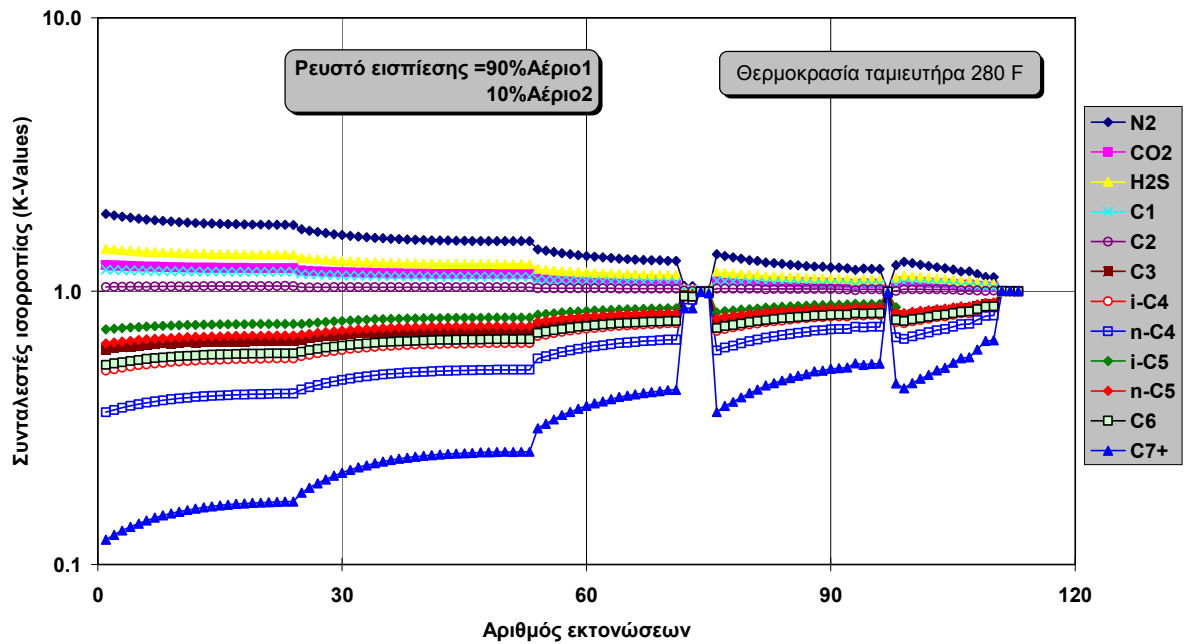
Στο σχήμα 8.8 φαίνονται οι τιμές που παίρνουν οι συντελεστές ισορροπίας των συστατικών (K-Values) κατά την διαδικασία της ανάμιξης του ρευστού του ταμιευτήρα με ρευστό εισπίεσης αποτελούμενο από 90% αέριο 1 και 10% αέριο 2.

Με σκοπό την εύρεση ρευστού εισπίεσης που να αναμιγνύεται με το ρευστό του ταμιευτήρα σε συνθήκες ταμιευτήρα σχηματίσθηκε ένα νέο ρευστό εισπίεσης αποτελούμενο από **80% αέριο 1** και **20% αέριο 2**. Η ελάχιστη πίεση ανάμιξής του με το ρευστό του ταμιευτήρα υπολογίσθηκε σε 4685 psi. Η πίεση αυτή είναι λίγο μεγαλύτερη από αυτή του ταμιευτήρα και έτσι ούτε και σε αυτή την περίπτωση το ρευστό εισπίεσης δεν μπορεί να εκτοπίσει με ανάμιξη το ρευστό του ταμιευτήρα στις υπάρχουσες συνθήκες.

Σχήμα 8.7
Αναπαράσταση της διαδικασίας ανάμιξης σε ψευδοτριαδικό διάγραμμα



Σχήμα 8.8
Εξέλιξη των συντελεστών ισορροπίας κατά την διαδικασία της ανάμιξης



Στο σχήμα 8.9 απεικονίζεται η διαδικασία ανάμιξης όπου το ρευστό εισπίεσης αποτελείται από 80% αέριο 1 και 20% αέριο 2. Το ψευδοτριαδικό διάγραμμα στο σχήμα 8.9 παρουσιάζει παρόμοια μορφή με το σχήμα 8.7.

Η εκτέλεση του προγράμματος MMP για την περίπτωση όπου το ρευστό εισπίεσης ήταν 80% αέριο 1 και 20% αέριο 2 είχε διάρκεια περίπου 8 λεπτά και διενεργήθηκαν 207 υπολογισμοί ισορροπίας φάσεων.

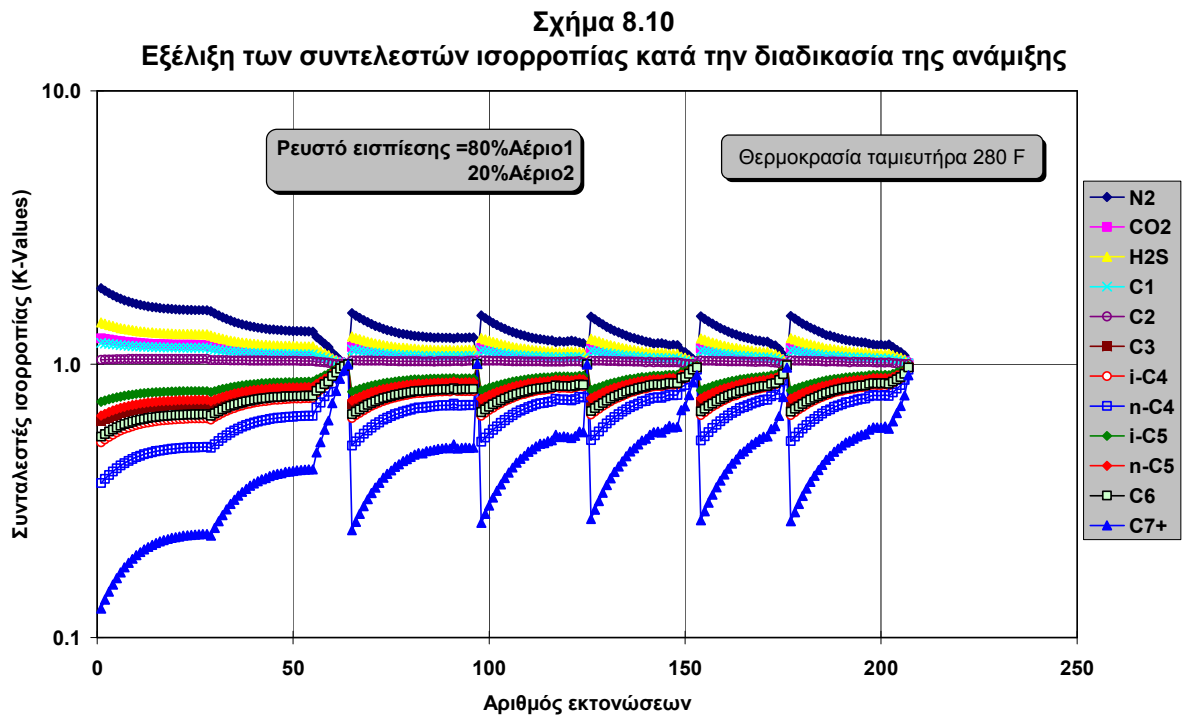
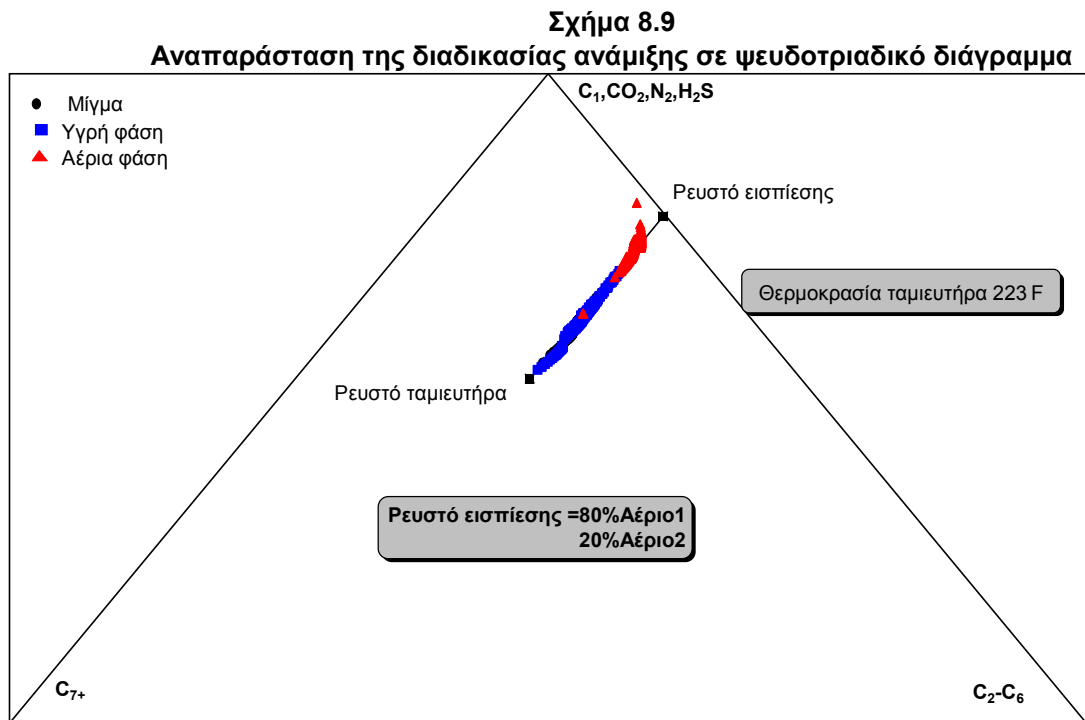
Στο σχήμα 8.10 φαίνονται οι τιμές που παίρνουν οι συντελεστές ισορροπίας των συστατικών (K-Values) κατά την διαδικασία της ανάμιξης του ρευστού του ταμιευτήρα με ρευστό εισπίεσης αποτελούμενο από 80% αέριο 1 και 20% αέριο 2.

Τέλος σχηματίστηκε ρευστό εισπίεσης αποτελούμενο από **70% αέριο 1** και **30% αέριο 2**. Η ελάχιστη πίεση ανάμιξης του ρευστού εισπίεσης με το ρευστό του ταμιευτήρα υπολογίστηκε ότι είναι 4431 psi. Η πίεση αυτή είναι μικρότερη από την πίεση του ταμιευτήρα (4565 psi) οπότε η μέθοδος ανάμιξης με συμπύκνωση μπορεί να εφαρμοσθεί στον ταμιευτήρα χρησιμοποιώντας αυτό το ρευστό εισπίεσης αν θεωρηθεί ότι η διαφορά των 122 psi από την πίεση του ταμιευτήρα είναι αρκετή και ο υπολογισμός της ελάχιστης πίεσης ανάμιξης είναι ακριβής.

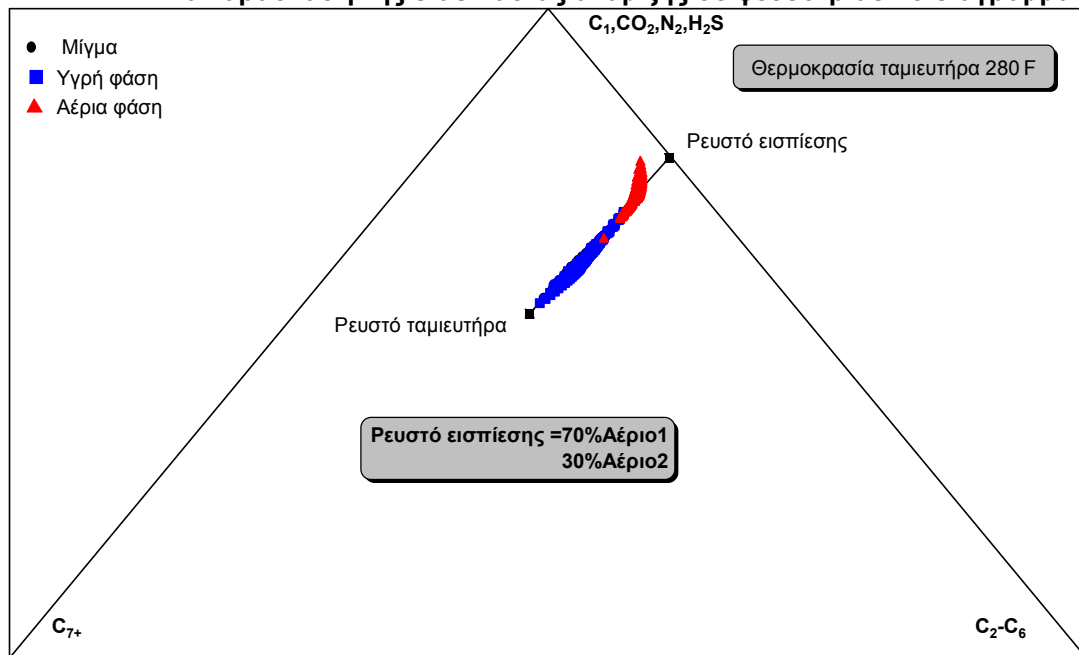
Στο σχήμα 8.11 απεικονίζεται η διαδικασία ανάμιξης όπου το ρευστό εισπίεσης αποτελείται από 70% αέριο 1 και 30% αέριο 2. Το ψευδοτριαδικό διάγραμμα στο σχήμα 8.11 παρουσιάζει παρόμοια μορφή με τα σχήματα 8.7 και 8.9 με την διαφορά ότι οι φάκελοι φάσεων είναι περισσότερο σχηματισμένοι από ότι στις άλλες περιπτώσεις, πράγμα που οφείλεται στον επιπλέον εμπλουτισμό του ρευστού εισπίεσης σε ενδιάμεσου μοριακού βάρους υδρογονάνθρακες (αέριο 2).

Η εκτέλεση του προγράμματος MMP για την περίπτωση όπου το ρευστό εισπίεσης ήταν 70% αέριο 1 και 30% αέριο 2 είχε διάρκεια περίπου 13 λεπτά και διενεργήθηκαν 249 υπολογισμοί ισορροπίας φάσεων .

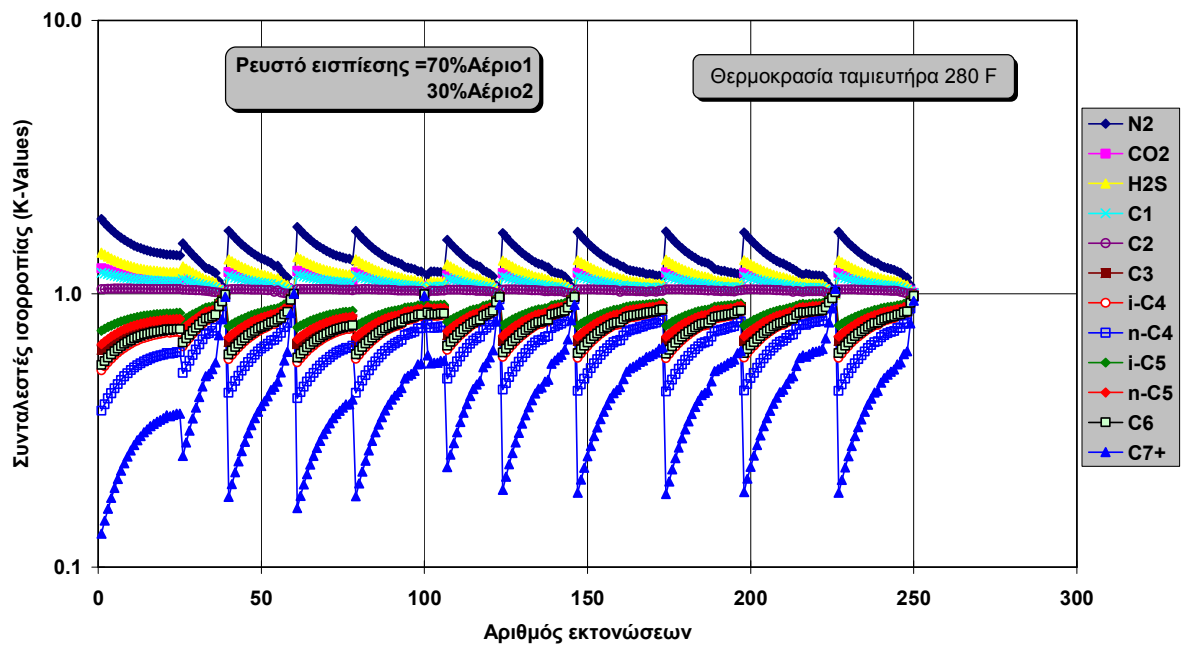
Στο σχήμα 8.12 φαίνονται οι τιμές που παίρνουν οι συντελεστές ισορροπίας των συστατικών (K-Values) κατά την διαδικασία της ανάμιξης του ρευστού του ταμιευτήρα με ρευστό εισπίεσης αποτελούμενο από 70% αέριο 1 και 30% αέριο 2.



Σχήμα 8.11
Αναπαράσταση της διαδικασίας ανάμιξης σε ψευδοτριαδικό διάγραμμα



Σχήμα 8.12
Εξέλιξη των συντελεστών ισορροπίας κατά την διαδικασία της ανάμιξης



8.3 Σύστημα ανάμιξης ρευστών από την πετρελαϊκή βιομηχανία (Μέση Ανατολή #2)

Το πρόγραμμα εύρεσης της ελάχιστης πίεσης ανάμιξης χρησιμοποιήθηκε σε μία ακόμα περίπτωση για ένα σύστημα ρευστού ταμιευτήρα - ρευστού εισπίεσης από τη Μέση Ανατολή.

Η θερμοκρασία του ταμιευτήρα ήταν 223 F. Το μοριακό βάρος του κλάσματος C₇₊ του ρευστού του ταμιευτήρα ήταν 170 και η σχετική πυκνότητά του 0,805 γρ/κ.ε. Η πίεση του ταμιευτήρα δεν είναι γνωστή.

Ως ρευστό εισπίεσης χρησιμοποιήθηκε το ρευστό του διαχωριστήρα που ονομάστηκε **αέριο 1** και μίγματά του με αέριο που αποτελείται από 70% CO₂ και 30% προπάνιο το οποίο ονομάστηκε **αέριο 2**.

Έγιναν τέσσερις δοκιμές ανάμιξης του ρευστού του ταμιευτήρα ως εξής:

- * Ανάμιξη με το αέριο του διαχωριστήρα
- * Ανάμιξη με το ρευστό εισπίεσης που αποτελείται από αέριο 1 (90%) και αέριο 2 (10%)
- * Ανάμιξη με το ρευστό εισπίεσης που αποτελείται από αέριο 1 (80%) και αέριο 2 (20%)
- * Ανάμιξη με το ρευστό εισπίεσης που αποτελείται από αέριο 1 (70%) και αέριο 2 (30%)

Η ανάμιξη με τη μέθοδο της συμπύκνωσης δεν είναι δυνατή για τις δύο πρώτες περιπτώσεις.

Σε αυτές τις περιπτώσεις η αναμίξιμη μετατόπιση γίνεται με τη βοήθεια της μεθόδου ανάμιξης με εξάτμιση, όπως διαπιστώνεται από το πρόγραμμα MMP, διότι κατά την ανάμιξη των ρευστών η υγρή φάση σε ισορροπία που δημιουργείται δεν εμπλουτίζεται από το ρευστό εισπίεσης αντίθετα αφαιρούνται από αυτή σταδιακά τα ελαφρά συστατικά. Η μέθοδος ανάμιξης με εξάτμιση δεν καλύπτεται από αυτή την εργασία.

Κατόπιν δημιουργήθηκε ρευστό εισπίεσης με μεγαλύτερο ποσοστό υδρογονανθράκων μέσου MB από τα δύο προηγούμενα (αέριο διαχωριστήρα, 80% αέριο1 - 20% αέριο2) προκειμένου να είναι εφικτή η ανάμιξη με συμπύκνωση.

Όταν το ρευστό του ταμιευτήρα αναμιχθεί με ρευστό εισπίεσης, που αποτελείται από 80% αέριο 1 και 20% αέριο 2 η υπολογιζόμενη ελάχιστη πίεση ανάμιξης είναι 4266 psi. Οι συστάσεις του ρευστού του ταμιευτήρα και των ρευστών εισπίεσης εμφανίζονται στον πίνακα 8.4.

Στο σχήμα 8.13 απεικονίζεται σε ψευδοτριαδικό διάγραμμα η εξέλιξη της ανάμιξης του ρευστού του ταμιευτήρα με ρευστό εισπίεσης που αποτελείται από **80% αέριο 1** και **20% αέριο 2**. Τα ρευστά ισορροπίας βρίσκονται κοντά στη γραμμή που ενώνει τις συστάσεις των αρχικών ρευστών και σχηματίζουν μέρος των φακέλων φάσεων για κάθε τιμή πίεσης που προκύπτει κατά την εκτέλεση του προγράμματος.

Στο σχήμα 8.14 φαίνονται οι τιμές των συντελεστών ισορροπίας των συστατικών, όπως διαμορφώνονται κατά την εξέλιξη του πειράματος και η σταδιακή σύγκλισή τους κοντά στην τιμή 1.

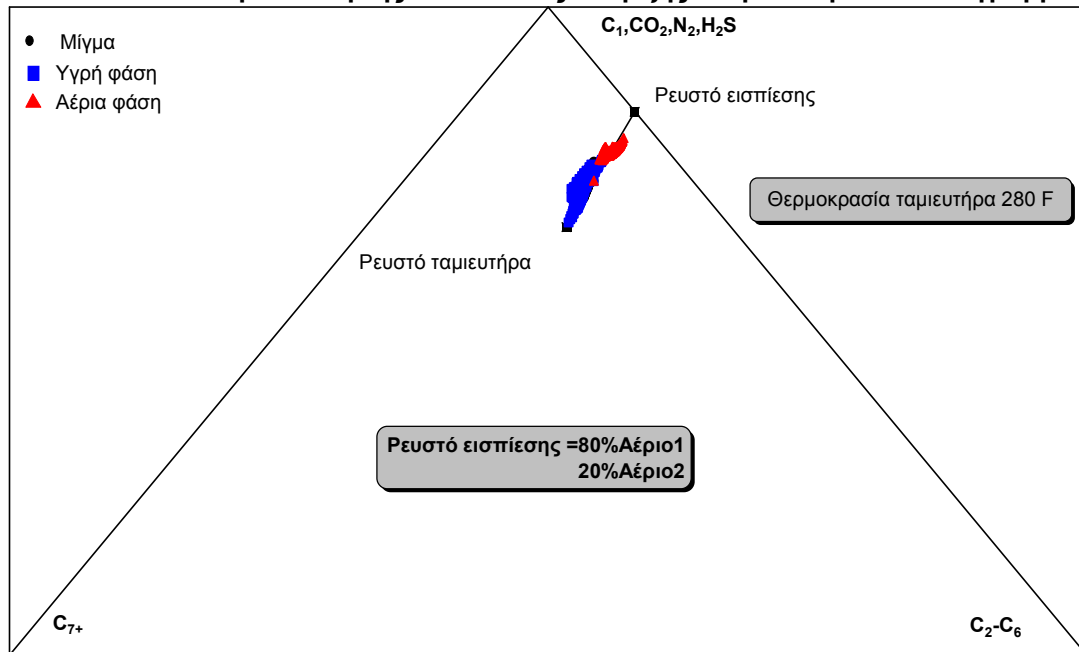
ΣΥΣΤ.	ΡΕΥΣΤΟ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΑ (mole%)	ΑΕΡΙΟ ΔΙΑΧΩΡΙΣΤ. ΑΕΡΙΟ-1 (mole%)	ΑΕΡΙΟ ΜΙΞΗΣ ΑΕΡΙΟ-2 (mole%)	90%ΑΕΡΙΟ1 10%ΑΕΡΙΟ2 (mole%)	80%ΑΕΡΙΟ1 20%ΑΕΡΙΟ2 (mole%)	70%ΑΕΡΙΟ1 30% ΑΕΡΙΟ2 (mole%)
N ₂	0.320	0.40	0.000	0.396	0.352	0.308
CO ₂	4.550	5.830	70.000	12.247	18.664	25.081
H ₂ S	12.670	11.740	0.000	10.566	9.392	8.218
C ₁	48.500	69.280	0.000	62.352	55.424	48.496
C ₂	7.150	7.730	0.000	6.957	6.184	5.411
C ₃	4.410	3.130	30.000	5.817	8.504	11.191
I-C ₄	0.960	0.450	0.000	0.405	0.36	0.315
N-C ₄	2.160	0.810	0.000	0.729	0.648	0.567
I-C ₅	0.970	0.210	0.000	0.189	0.168	0.147
N-C ₅	1.150	0.190	0.000	0.171	0.152	0.133
C ₆	1.870	0.120	0.000	0.108	0.096	0.084
C ₇₊	15.290	0.070	0.000	0.063	0.056	0.049
ΥΠΟΛΟΓΙΖΟΜΕΝΗ ΕΛΑΧΙΣΤΗ ΠΙΕΣΗ ΑΝΑΜΙΞΗΣ (psi)		Μηχανισμός ανάμιξης με εξάτμιση		Μηχανισμός ανάμιξης με εξάτμιση	4266	4129

Πίνακας 8.4

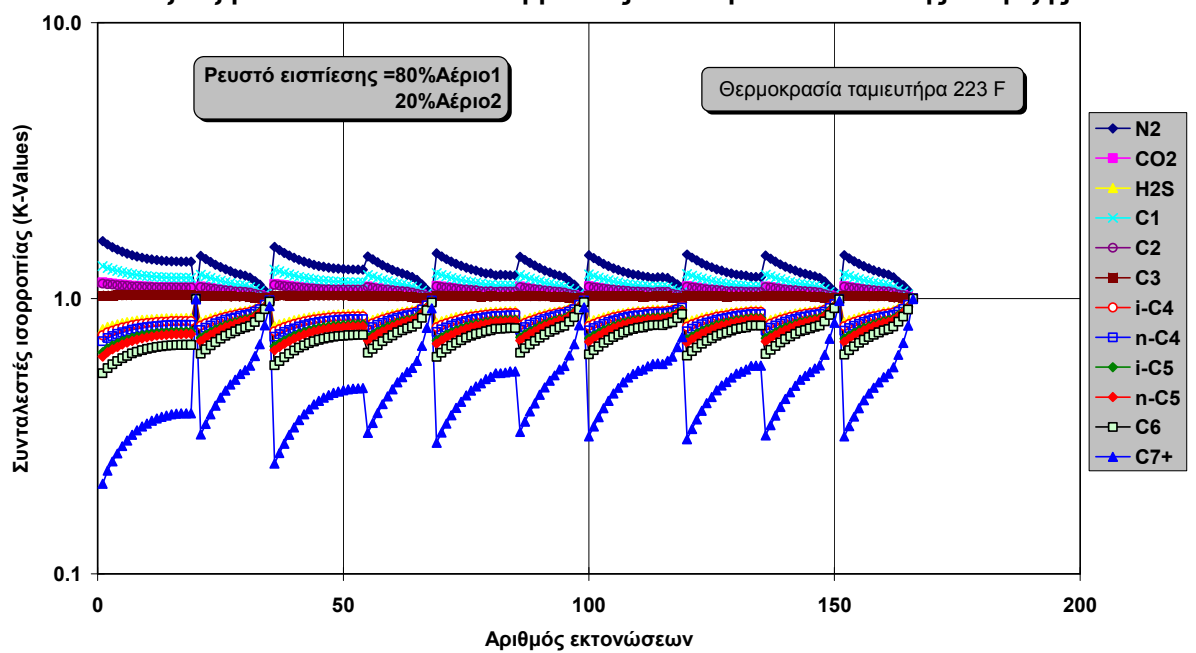
Συστάσεις ρευστών ανάμιξης

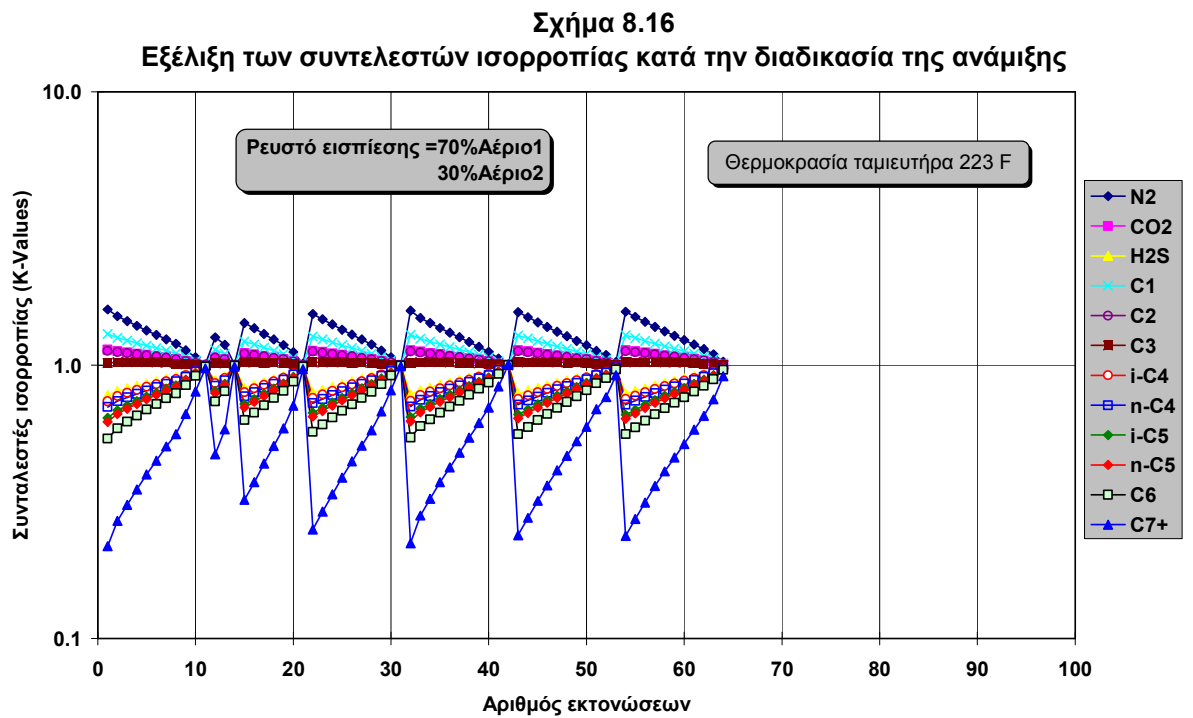
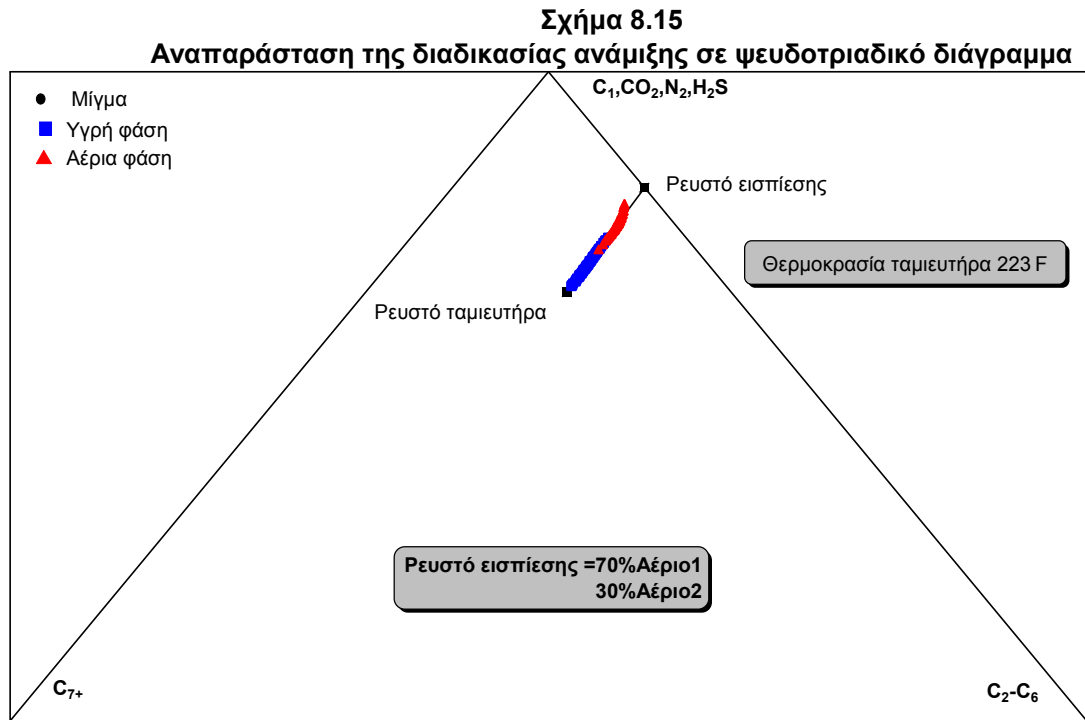
Για την ολοκλήρωση της διαδικασίας χρειάστηκαν 166 υπολογισμοί ισορροπίας φάσεων και 6 περίπου λεπτά.

Σχήμα 8.13
Αναπαράσταση της διαδικασίας ανάμιξης σε ψευδοτριαδικό διάγραμμα



Σχήμα 8.14
Εξέλιξη των συντελεστών ισορροπίας κατά την διαδικασία της ανάμιξης





Τέλος, σχηματίσθηκε ρευστό προς εισπίεση το οποίο αποτελείται από **70% αέριο 1** και **30% αέριο 2**.

Η υπολογιζόμενη ελάχιστη πίεση ανάμιξης είναι 4129 psi.

Στο σχήμα 8.15 απεικονίζεται η διαδικασία ανάμιξης των ρευστών. Τα σημεία που απεικονίζουν τα ρευστά ισορροπίας εμφανίζονται πάνω σχεδόν στη γραμμή που ενώνει τα προς ανάμιξη ρευστά.

Στο σχήμα 8.16 φαίνεται η εξέλιξη των συντελεστών ισορροπίας των συστατικών (K-Values) κατά τη διαδικασία ανάμιξης του ρευστού του ταμιευτήρα με ρευστό εισπίεσης αποτελούμενο από 70% αέριο 1 και 30% αέριο 2. Η ολοκλήρωση της διαδικασίας χρειάστηκε 64 υπολογισμούς ισορροπίας φάσεων και 2 περίπου λεπτά.

8.4 Σύστημα ανάμιξης ρευστών από την Ελληνική πετρελαϊκή βιομηχανία

Υπολογισμός με την μέθοδο MMP έγινε και για την περίπτωση του Βόρειου Πρίνου.

Το ζητούμενο σε αυτήν την περίπτωση ήταν να βρεθεί κατάλληλο ρευστό εισπίεσης, ώστε να είναι εφικτή η αναμίξιμη εκτόπιση του ρευστού του ταμιευτήρα στις συνθήκες που επικρατούν σήμερα στον ταμιευτήρα.

Ως βάση για την δημιουργία του ρευστού εισπίεσης χρησιμοποιήθηκε το αέριο του διαχωριστήρα, που ονομάσθηκε αέριο 1. Επίσης δημιουργήθηκε αέριο με αναλογία 60% CO₂ και 40% προπάνιο, το οποίο ονομάσθηκε αέριο 2. Μίγματα των δύο ρευστών σε διάφορες αναλογίες χρησιμοποιήθηκαν ως ρευστά εισπίεσης. Τα ρευστά εισπίεσης που χρησιμοποιήθηκαν είναι τα εξής:

- * Αέριο διαχωριστήρα (Αέριο 1)
- * 90% Αέριο 1 -10% Αέριο 2
- * 70% Αέριο 1 - 30% Αέριο 2
- * 60% Αέριο 1 - 40% Αέριο 2

Στον πίνακα 8.5 φαίνονται οι συστάσεις των ρευστών προς ανάμιξη, καθώς και η υπολογιζόμενη πίεση ανάμιξής τους.

Η θερμοκρασία του ταμιευτήρα είναι 210 F και η πίεσή του 5100 psi. Το μοριακό βάρος του κλάσματος C₇₊ του ρευστού του ταμιευτήρα είναι 271.6 και η πυκνότητά του είναι 0.86 γρ/κ.ε.

Στην πρώτη δοκιμή έγινε ανάμιξη του **ρευστού του ταμιευτήρα** με το **αέριο του διαχωριστήρα**. Η υπολογισθείσα ελάχιστη πίεση ανάμιξης είναι 5517 psi.

Η πίεση αυτή είναι μεγαλύτερη από την πίεση του ταμιευτήρα οπότε δεν μπορεί το αέριο του διαχωριστήρα να χρησιμοποιηθεί για την αναμίξιμη μετατόπιση του ρευστού του ταμιευτήρα.

Στο σχήμα 8.17 απεικονίζεται σε ψευδοτριαδικό διάγραμμα η εξέλιξη της ανάμιξης του ρευστού του ταμιευτήρα με το αέριο του διαχωριστήρα. Τα ρευστά ισορροπίας σχηματίζουν μέρος των φακέλων φάσεων για κάθε τιμή πίεσης που προκύπτει κατά την εκτέλεση του προγράμματος και σταδιακά πλησιάζουν μεταξύ τους προσεγγίζοντας το κρίσιμο σημείο όπου καθορίζεται η ελάχιστη πίεση ανάμιξης.

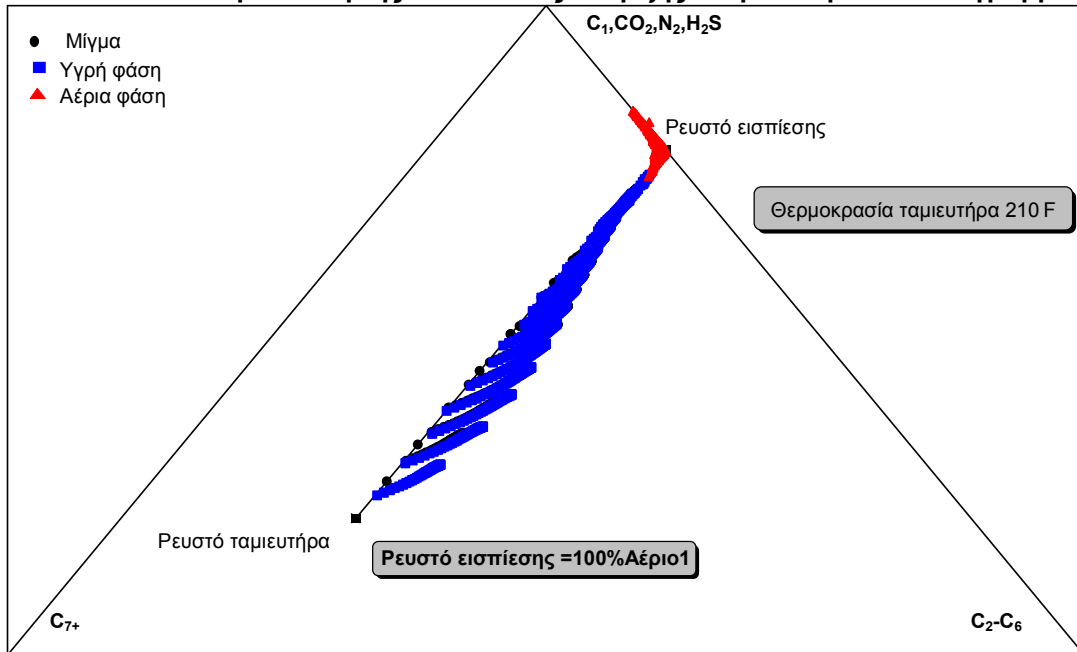
Στο σχήμα 8.18 φαίνονται οι τιμές που παίρνουν οι συντελεστές ισορροπίας των συστατικών (K-Values) κατά την διαδικασία της ανάμιξης του ρευστού του ταμιευτήρα με το αέριο του διαχωριστήρα. Οι τιμές συγκλίνουν στην ελάχιστη πίεση ανάμιξης μετά από μεγάλο αριθμό εκτονώσεων σε αυτή την περίπτωση.

Για την ολοκλήρωση της διαδικασίας χρειάσθηκαν 1041 υπολογισμοί ισορροπίας φάσεων και 20 περίπου λεπτά.

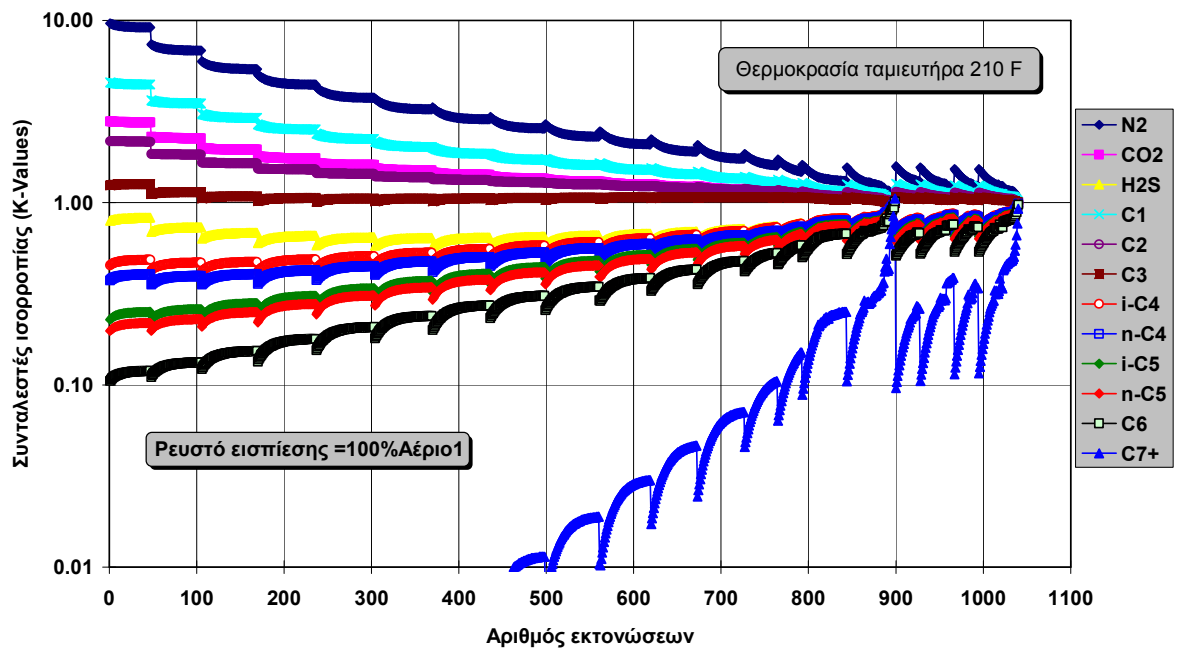
Κατόπιν το ρευστό του ταμιευτήρα αναμίχθηκε με ρευστό εισπίεσης αποτελούμενο από **90% αέριο1** (αέριο διαχωριστήρα) και **10% αέριο2** (60% CO₂ - 40% προπάνιο). Η υπολογιζόμενη ελάχιστη πίεση ανάμιξης είναι 5277 psi.

Και σε αυτή την περίπτωση η πίεση που απαιτείται για αναμίξιμη μετατόπιση είναι μεγαλύτερη από την πίεση του ταμιευτήρα αλλά είναι σαφώς μικρότερη από την περίπτωση όπου το ρευστό εισπίεσης ήταν το αέριο του διαχωριστήρα.

Σχήμα 8.17
Αναπαράσταση της διαδικασίας ανάμιξης σε ψευδοτριαδικό διάγραμμα



Σχήμα 8.18
Εξέλιξη των συντελεστών ισορροπίας κατά την διαδικασία της ανάμιξης



ΣΥΣΤ.	ΡΕΥΣΤΟ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΑ (mole%)	ΑΕΡΙΟ ΔΙΑΧΩΡΙΣΤ. ΑΕΡΙΟ-1 (mole%)	ΑΕΡΙΟ ΜΙΞΗΣ ΑΕΡΙΟ-2 (mole%)	90%ΑΕΡΙΟ1 10%ΑΕΡΙΟ2 (mole%)	70%ΑΕΡΙΟ1 30%ΑΕΡΙΟ2 (mole%)	60%ΑΕΡΙΟ1 40% ΑΕΡΙΟ2 (mole%)
N ₂	0.520	2.120	0.000	1.908	1.484	1.272
CO ₂	0.728	1.445	60.000	7.301	19.012	24.867
H ₂ S	7.560	12.164	0.000	10.948	8.515	7.298
C ₁	12.247	62.023	0.000	55.821	43.416	37.214
C ₂	2.987	9.787	0.000	8.808	6.851	5.872
C ₃	4.418	7.723	40.000	10.951	17.406	20.634
I-C ₄	1.478	1.332	0.000	1.199	0.932	0.799
N-C ₄	3.091	1.987	0.000	1.788	1.391	1.192
I-C ₅	3.002	0.742	0.000	0.668	0.519	0.445
N-C ₅	2.347	0.423	0.000	0.381	0.296	0.254
C ₆	4.490	0.254	0.000	0.229	0.178	0.152
C ₇₊	57.132	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
ΥΠΟΛΟΓΙΖΟΜΕΝΗ ΕΛΑΧΙΣΤΗ ΠΙΕΣΗ ΑΝΑΜΙΞΗΣ (psi)		5517		5277	5122	5010

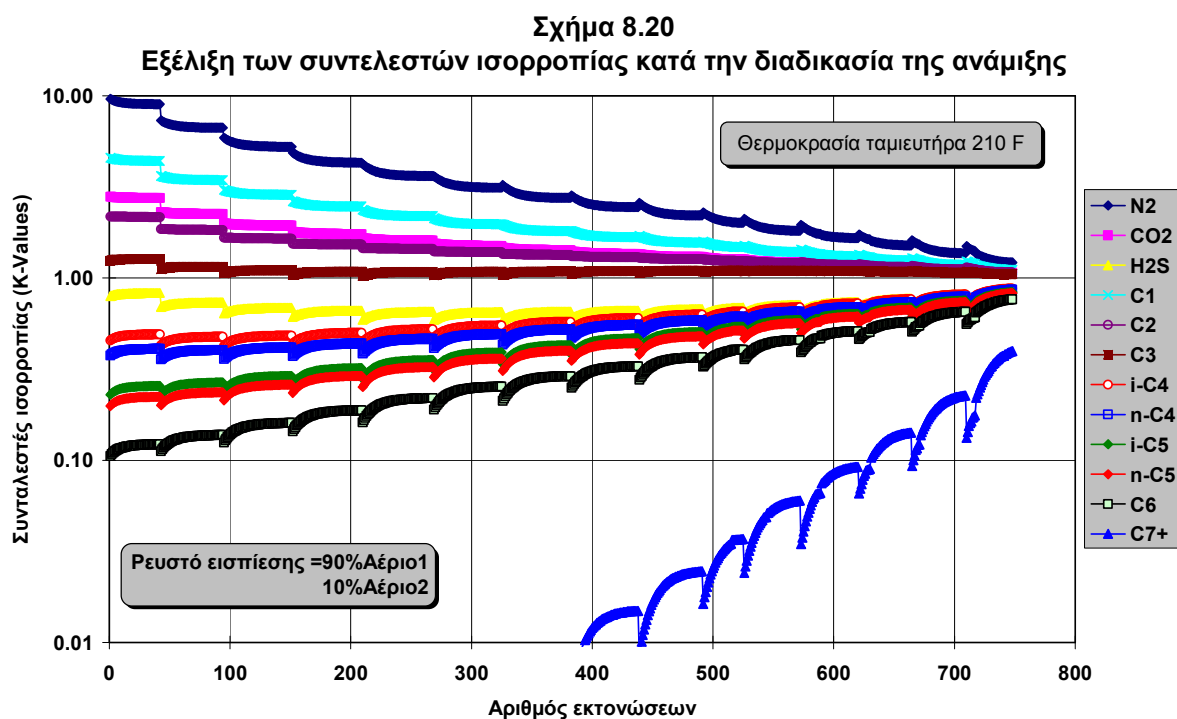
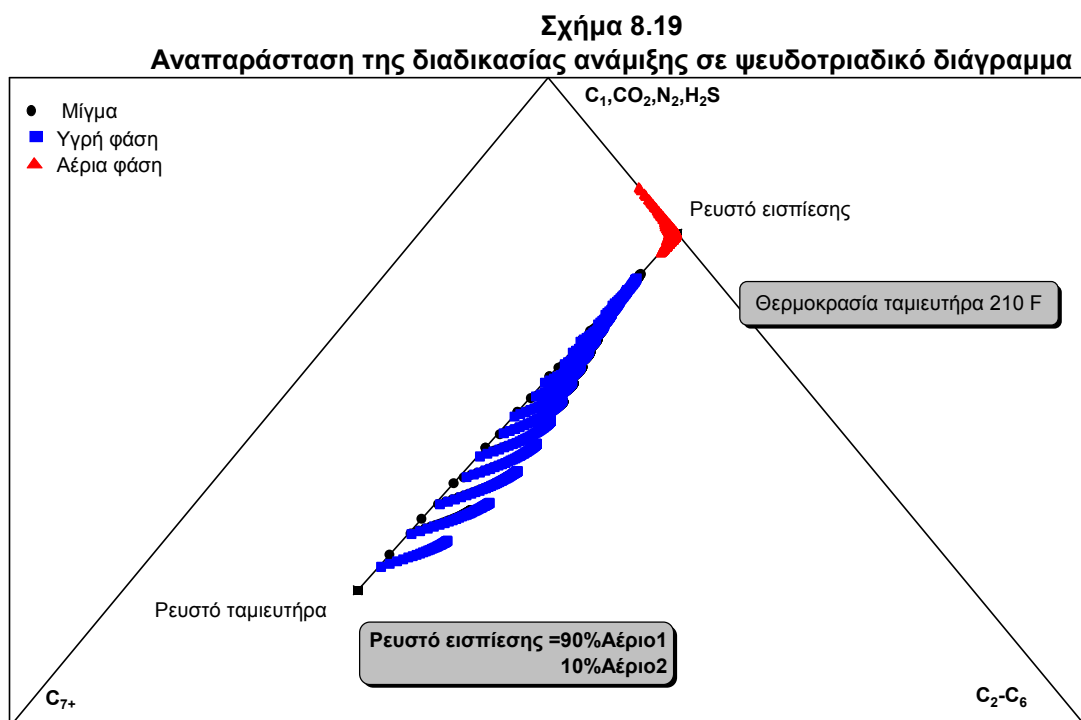
Πίνακας 8.5

Συστάσεις ρευστών ανάμιξης

Στο σχήμα 8.19 απεικονίζεται σε ψευδοτριαδικό διάγραμμα η εξέλιξη της ανάμιξης του ρευστού του ταμιευτήρα με ρευστό εισπίεσης αποτελούμενο από 90% αέριο1 και 10% αέριο2. Η μορφή του διαγράμματος εμφανίζεται σχεδόν ίδια με την περίπτωση όπου το ρευστό εισπίεσης ήταν το αέριο του διαχωριστήρα.

Στο σχήμα 8.20 φαίνονται οι τιμές που παίρνουν οι συντελεστές ισορροπίας των συστατικών (K-Values) κατά την διαδικασία της ανάμιξης του ρευστού του ταμιευτήρα με ρευστό εισπίεσης αποτελούμενο από 90% αέριο 1 και 10% αέριο 2.

Για την ολοκλήρωση της διαδικασίας χρειάστηκαν 748 υπολογισμοί ισορροπίας φάσεων και 15 περίπου λεπτά.



Με βάση τα παραπάνω κρίθηκε απαραίτητο να σχηματισθεί νέο με ρευστό εισπίεσης αποτελούμενο από **70% αέριο1** και **30% αέριο2** για την ανάμιξή του με το ρευστό του ταμειυτήρα. Η υπολογιζόμενη ελάχιστη πίεση ανάμιξης είναι 5122 psi.

Η πίεση που απαιτείται για αναμίξιμη μετατόπιση εμφανίζεται λίγο μεγαλύτερη από αυτή του ταμιευτήρα συμπίερασμα που οδηγεί στον σχηματισμό ρευστού εισπίεσης με μεγαλύτερο ποσοστό σε αέριο 2 .

Στο σχήμα 8.21 απεικονίζεται σε ψευδοτριαδικό διάγραμμα η εξέλιξη της ανάμιξης του ρευστού του ταμιευτήρα με ρευστό εισπίεσης αποτελούμενο από 70% αέριο 1 και 30% αέριο 2. Η μορφή του διαγράμματος εμφανίζεται παρόμοια με αυτή των σχημάτων 8.17 & 8.19.

Στο σχήμα 8.22 φαίνονται οι τιμές που παίρνουν οι συντελεστές ισορροπίας των συστατικών (K-Values) κατά την διαδικασία της ανάμιξης του ρευστού του ταμιευτήρα με ρευστό εισπίεσης αποτελούμενο από 70% αέριο 1 και 30% αέριο2.

Για την ολοκλήρωση της διαδικασίας χρειάσθηκαν 543 υπολογισμοί ισορροπίας φάσεων και 11 περίπου λεπτά.

Τέλος σχηματίσθηκε ρευστό εισπίεσης αποτελούμενο από **60% αέριο1** και **40% αέριο2** για την ανάμιξή του με το ρευστό του ταμιευτήρα. Η υπολογιζόμενη ελάχιστη πίεση ανάμιξης είναι 5010 psi.

Το ρευστό εισπίεσης στην περίπτωση αυτή είναι ικανό για αναμίξιμη μετατόπιση διότι η ελάχιστη πίεση ανάμιξής του εμφανίζεται μικρότερη από αυτή του ταμιευτήρα.

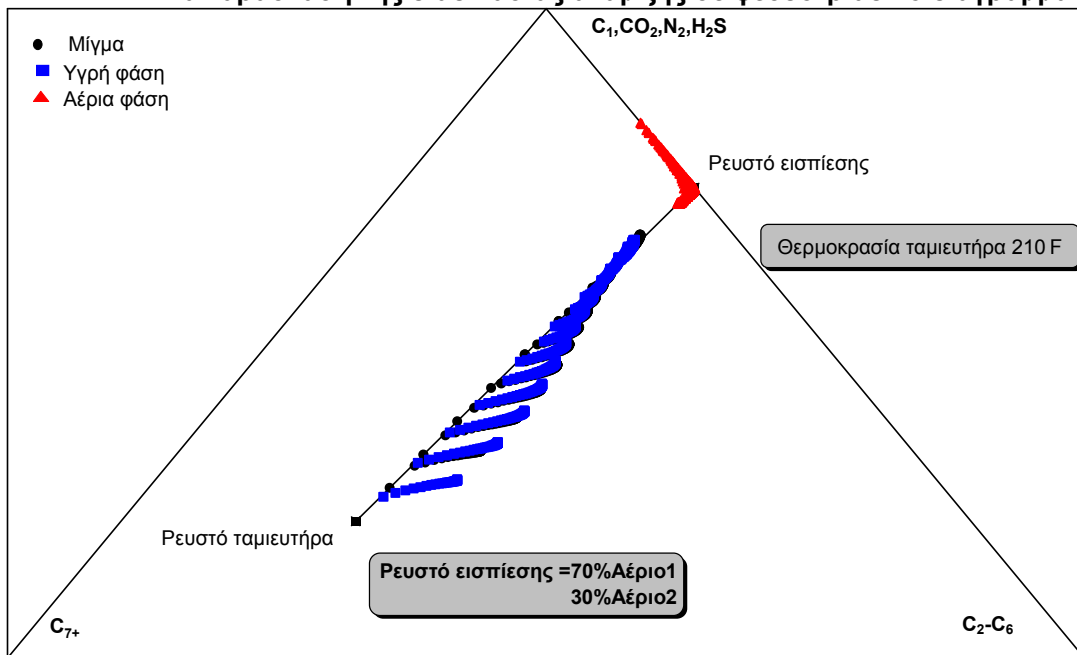
Στο σχήμα 8.23 απεικονίζεται σε ψευδοτριαδικό διάγραμμα η εξέλιξη της ανάμιξης του ρευστού του ταμιευτήρα με ρευστό εισπίεσης αποτελούμενο από 60% αέριο1 και 40% αέριο2.

Στο σχήμα 8.24 φαίνονται οι τιμές που παίρνουν οι συντελεστές ισορροπίας των συστατικών (K-Values) κατά την διαδικασία της ανάμιξης του ρευστού του ταμιευτήρα με ρευστό εισπίεσης αποτελούμενο από 60% αέριο1 και 40% αέριο2.

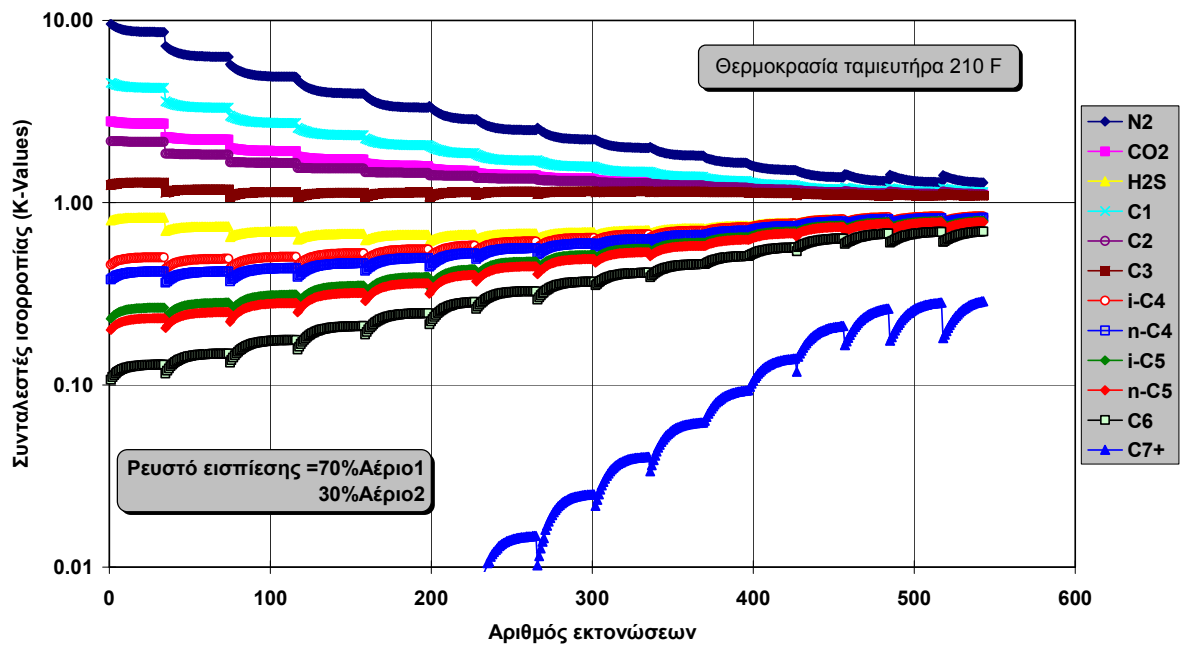
Για την ολοκλήρωση της διαδικασίας χρειάσθηκαν 455 υπολογισμοί ισορροπίας φάσεων και 13 περίπου λεπτά.

Τα διαγράμματα που εμφανίζονται στα σχήματα από 8.1 έως 8.24 δημιουργήθηκαν με την χρήση μακροεντολών από το λογιστικό πακέτο MSEXCEL οι οποίες κατασκευάσθηκαν για το σκοπό αυτό και παρουσιάζονται στο παράρτημα Β.

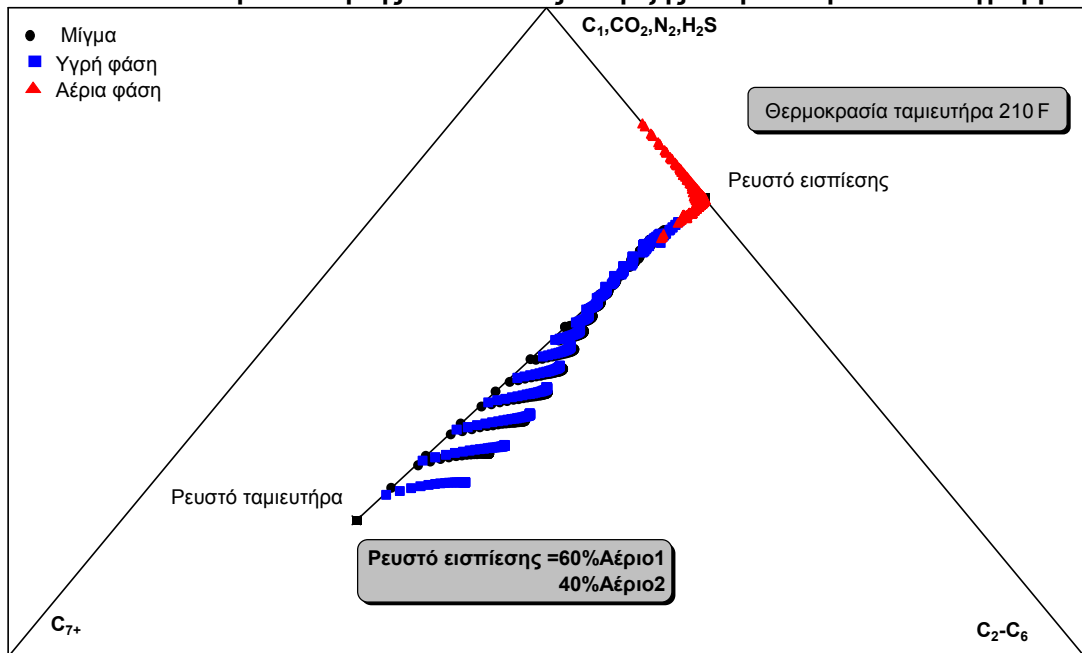
Σχήμα 8.21
Αναπαράσταση της διαδικασίας ανάμιξης σε ψευδοτριαδικό διάγραμμα



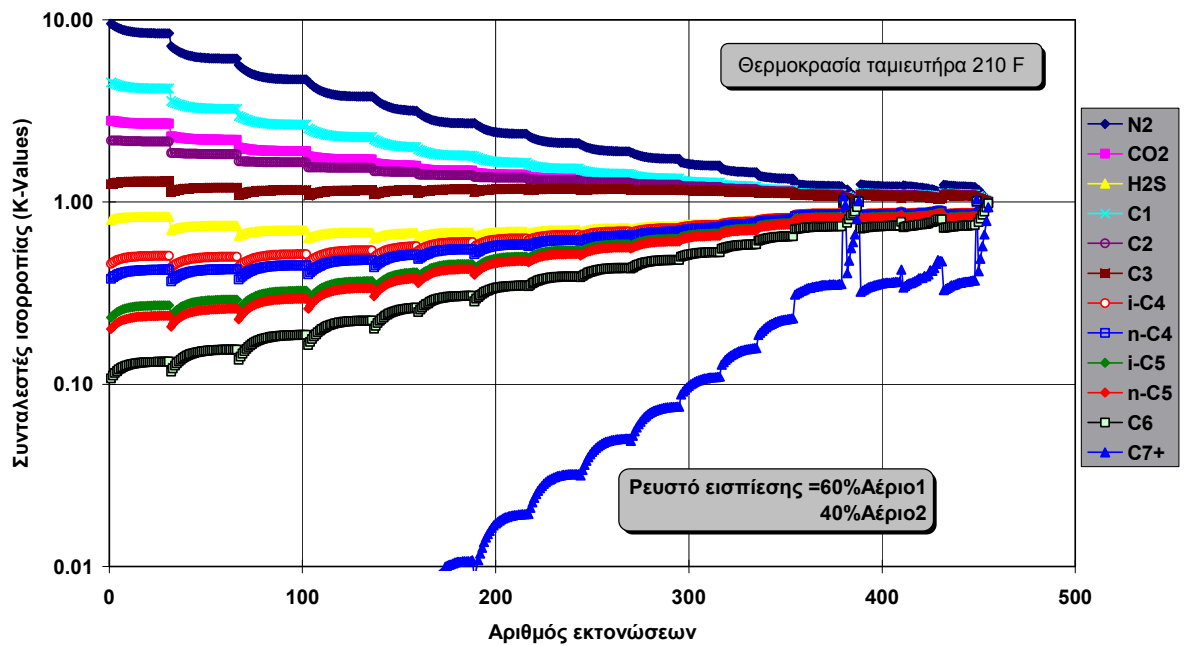
Σχήμα 8.22
Εξέλιξη των συντελεστών ισορροπίας κατά την διαδικασία της ανάμιξης



Σχήμα 8.23
Αναπαράσταση της διαδικασίας ανάμιξης σε ψευδοτριανγικό διάγραμμα



Σχήμα 8.24
Εξέλιξη των συντελεστών ισορροπίας κατά την διαδικασία της ανάμιξης



9. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία αναπτύχθηκε μία μέθοδος υπολογισμού της ελάχιστης πίεσης ανάμιξης του πετρελαίου του ταμιευτήρα με ρευστό εισπίεσης με το μηχανισμό της ανάμιξης με συμπύκνωση.

Έχει αναπτυχθεί πρόγραμμα σε γλώσσα FORTRAN77 το οποίο ονομάστηκε MMP όπου γίνεται μαθηματική προσομοίωση της διαδικασίας ανάμιξης σε υπολογιστή. Οι υπολογισμοί έχουν βασιστεί στην καταστατική εξίσωση των Peng-Robinson (Peng-Robinson EOS).

Η μέθοδος MMP στηρίζεται στην εύρεση διφασικής περιοχής στην οποία θα ανήκει μίγμα των ρευστών ταμιευτήρα και εισπίεσης, ενώ δεν ελέγχει τις περιοχές όπου το μίγμα των ρευστών θα είναι μονοφασικό. Μετά την εύρεση της διφασικής περιοχής, υπολογίζεται η ισορροπία φάσεων του μίγματος δηλαδή η υγρή και η αέρια φάση σε ισορροπία. Μίγμα της υγρής φάσης σε ισορροπία με το ρευστό εισπίεσης εκτονώνεται, δίνοντας νέες φάσεις σε ισορροπία. Σε κάθε στάδιο επιλογής νέου μίγματος ρευστών προς εκτόνωση επιλέγεται μίγμα το οποίο αποτελείται κατά 90% από την υγρή φάση σε ισορροπία και κατά 10% από το ρευστό εισπίεσης. Η επιλογή αυτή είναι πολύ σημαντική, διότι έτσι εξασφαλίζεται η ελαχιστοποίηση των μαθηματικών προβλημάτων που προκύπτουν όταν το μίγμα των ρευστών που πρόκειται να εκτονωθεί βρίσκεται κοντά στο σημείο δρόσου του.

Με βάση τις καταστατικές εξισώσεις υπολογίζονται οι συστάσεις των ρευστών (φάσεων), που προκύπτουν στα διάφορα στάδια της ανάμιξης των ρευστών με το μηχανισμό της συμπύκνωσης. Η μέθοδος πλεονεκτεί σημαντικά σε ταχύτητα, αλλά και σε κόστος εφαρμογής σε σχέση με μεθόδους στις οποίες διενεργείται πραγματική ανάμιξη και τα αποτελέσματα εξάγονται κατόπιν παρατηρήσεων. Έτσι, η μέθοδος εμφανίζεται ταχύτερη από τις πειραματικές μεθόδους, όπως ανάμιξη ρευστών σε λεπτό σωλήνα (slim tube) και παρατήρηση ανάμιξης σε οπτικό PVT κελίο (windowed PVT cell). Ο χρόνος που απαιτείται για την εφαρμογή της, είναι το πολύ 20 λεπτά και αν προστεθεί σε αυτόν ο χρόνος που χρειάζεται για την εισαγωγή των δεδομένων, τότε ο συνολικός χρόνος φτάνει τα 25 λεπτά. Η ταχύτητα μπορεί να αυξηθεί με την χρήση υπολογιστή με βελτιωμένες προδιαγραφές. Στις άλλες μεθόδους απαιτούνται αρκετές ώρες ή ακόμα και ημέρες για την εξαγωγή των ίδιων αποτελεσμάτων, ενώ θα πρέπει να

συνυπολογιστεί ο χρόνος της μεταφοράς των δειγμάτων των ρευστών από το χώρο της εκμετάλλευσης, στο χώρο του εργαστηρίου.

Το κόστος της μεθόδου που παρουσιάζεται σε αυτήν την εργασία είναι επίσης πολύ μικρό, μιας και το μόνο που χρειάζεται, είναι ένας υπολογιστής με τις προδιαγραφές που έχουν αναφερθεί. Αντιθέτως, οι εργαστηριακές μέθοδοι προσδιορισμού της διαδικασίας ανάμιξης, απαιτούν πολύπλοκο και πολυδάπανο εργαστηριακό εξοπλισμό, εξειδικευμένο προσωπικό για την υποστήριξή του, καθώς και τους ανάλογους χώρους εργασίας.

Το μειονέκτημα της μεθόδου MMP σε σχέση με τις πειραματικές μεθόδους είναι το γεγονός ότι, εμφανίζει μικρότερη ικανότητα να αναπαριστά το φυσικό φαινόμενο της ανάμιξης μιας και οι εξισώσεις που χρησιμοποιεί απλοποιούν τις σύνθετες διαδικασίες που υπάρχουν στις φυσικοχημικές διεργασίες.

Σύγκριση της μεθόδου MMP με άλλες υπολογιστικές μεθόδους, όσον αφορά την ταχύτητα εύρεσης της λύσης, δεν μπορεί να γίνει, λόγω έλλειψης πληροφοριών που έχουν σχέση με το χρόνο που απαιτείται από τις άλλες μεθόδους για την εύρεση της λύσης.

Ιδιαίτερο χαρακτηριστικό της μεθόδου MMP είναι ότι για την εύρεση της τιμής της ελάχιστης πίεσης ανάμιξης θέτονται κατά την εξέλιξη της διαδικασίας άνω και κάτω όρια και κατόπιν προσδιορίζεται ταχύτατα το διάστημα στο οποίο ανήκει η λύση του προβλήματος. Ο περιορισμός του διαστήματος σταματά όταν η απαιτούμενη ακρίβεια του πειράματος γίνεται μεγαλύτερη από το διάστημα μεταξύ των ορίων, οπότε και δίνεται η τελική λύση του προβλήματος.

Τα αποτελέσματα που έχουν παραχθεί με την χρησιμοποίηση της μεθόδου MMP, έχουν συγκριθεί με αποτελέσματα εξαγόμενα από άλλες υπολογιστικές αλλά και εργαστηριακές μεθόδους. Η μέθοδος MMP έχει εφαρμοστεί σε διάφορα είδη ταμιευτήρα και ρευστών εισπίεσης με ικανοποιητικά αποτελέσματα. Τα στοιχεία που έχουν επεξεργασθεί, έχουν προέλθει από δημοσιευμένες εργασίες ή από την Ελληνική και διεθνή πετρελαϊκή βιομηχανία. Η ακρίβεια που εμφανίζει η μέθοδος κρίνεται ικανοποιητική και παρουσιάζει μέση απόκλιση γύρω στα 150 psi από τις εργαστηριακές μετρήσεις.

Με τη μέθοδο MMP μπορεί να προσδιοριστεί αν η ανάμιξη γίνεται με το μηχανισμό της πρώτης επαφής. Αν τα ρευστά του ταμιευτήρα και εισπίεσης είναι απευθείας αναμίξιμα, πράγμα το οποίο ελέγχεται από το πρόγραμμα MMP, τότε σαν αποτέλεσμα του πειράματος εξάγεται η πληροφορία ότι η ανάμιξη είναι πρώτης επαφής.

Συνοπτικά, εξάγονται τα εξής συμπεράσματα:

- * Η μέθοδος MMP εμφανίζεται ταχύτερη και με μικρότερο κόστος από τις εργαστηριακές μεθόδους.
- * Τα άνω και κάτω όρια της τιμής της ελάχιστης πίεσης ανάμιξης που θέτονται κατά την εκτέλεση του προγράμματος οριοθετούν ταχύτατα το διάστημα στο οποίο ανήκει η λύση του προβλήματος.
- * Σε κάθε στάδιο επιλογής νέου μίγματος ρευστών προς εκτόνωση επιλέγεται μίγμα το οποίο αποτελείται κατά 90% από την υγρή φάση σε ισορροπία και κατά 10% από το ρευστό εισπίεσης ώστε να βρίσκεται κοντά στο σημείο βρασμού του.
- * Τα αποτελέσματα της μεθόδου MMP, έχουν συγκριθεί με αποτελέσματα εξαγόμενα από άλλες υπολογιστικές, αλλά και εργαστηριακές μεθόδους με επιτυχία.

Η μέθοδος MMP μπορεί να βελτιωθεί ώστε να έχει τη δυνατότητα υπολογισμού της ελάχιστης πίεσης ανάμιξης για όλους του μηχανισμούς ανάμιξης. Αυτό μπορεί να συμβεί, αν προστεθούν υπορουτίνες που να υπολογίζουν την ελάχιστη πίεση που απαιτείται στην περίπτωση του μηχανισμού της ανάμιξης με εξάτμιση. Ο προσδιορισμός της διφασικής περιοχής πιθανώς να μπορεί να γίνει πιο αξιόπιστος χρησιμοποιώντας την θεωρία της ελεύθερης ενέργειας του Gibbs.

Ταυτόχρονη εργαστηριακή και υπολογιστική μελέτη ρευστών προς ανάμιξη μπορούν να δώσουν μία πιο ακριβή εικόνα της αξιοπιστίας της μεθόδου MMP. Μέσω των παρατηρήσεων και των πληροφοριών που θα αντληθούν από αυτή τη διαδικασία υπάρχει η δυνατότητα βελτιστοποίησης της μεθόδου και χρήση της σε όλους τους μηχανισμούς ανάμιξης με βελτιωμένα αποτελέσματα.

10. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Hutchinson, C.A.Jr. & Braun, P.H.: «Phase Relations of Miscible Displacement in oil Recovery,» *AIChE J.* (1961) 7, 64-72.
2. Stalkup E.T. : «Miscible Displacement» Monograph Series 1984,11.
3. Slobod, R.L., Koch, H.A. Jr.: «High Pressure Gas Injection-Mechanism of Recovery Increase,» *Drill. & Proc. Prac.*, API (1953) 82.
4. Rushing, M.D. et al.: «Nitrogen May Be Used for Miscible Displacement in Oil Reservoirs,» *J. Pet. Tech.* (Dec. 1978) 1715-16.
5. Jacoby, R.H. & Rzasa, M.J.: «Equilibrium Vaporization Ratios for Nitrogen, Methane, Carbon Dioxide, Ethane & Hydrogen Sulfide in Absorber Oil-Natural Gas & Crude Oil-Natural Gas Systems,» *Trans.*, AIME (1952) 195, 99-110.
6. Metcalfe, R.S.: «Effects of 'Impurities' on Minimum Miscibility Pressures and Minimum Enrichment Levels for CO₂ and Rich Gas Displacements,» paper SPE 9230 presented at the 1980 SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Dallas, Sept. 21-24.
7. Engineering Data Book, Natural Gas Processors Suppliers Assn., Tulsa (1957).
8. Poettman, F.H.: «Vaporization Characteristics of CO₂ in a Natural Gas-Crude Oil System,» *Trans.*, AIME (1951) 192,141-44.
9. Dumyuskin, I.I. & Namiot, A.Y.: «Mixinig Conditions of Oil with Carbon Dioxide,» *Neft. Khozyaistvo* (March 1978) 59-61.
10. Benham, A.L., Dowen, W.E. & Kunzman, W.J.: «Miscible Fluid Displacement - Prediction of Miscibility,» *Trans.*, AIME (1960) 219, 229-37: Miscible Processes, Reprint Series, SPE, Dallas (1965) 8,123-31.
11. Rowe, A.M. & Silberberg, I.H. : «Prediction of Phase Behavior Generated by the Enriched Gas Drive Process,» *SPEJ*, (June 1965) 160-66.
12. Metcalfe, R.S., Fussel, D.D. & Shelton, J.L.: «A Multicell Equilibrium Separation Model for the Study of Multiple Contacy Miscibility in Rich Gas Drives,» *SPEJ*, (June 1973) 147-55.
13. Zudkevitch, D. & Jaffe, J.: «Corellation & Prediction of Vapour-Liquid Equilibria with the Redlich-Kwong EOS,» *AIChE J.*, (Jan 1970) 112-19.
14. Corteville, J., Van Cuy, N. & Simandoux, P.: «A Numerical & Experimental Study of Miscible or Immiscible Fluid Flow in Porous Media with Interphase Mass Transfer,» paper SPE 3481 presented at the 1971 SPE Annual Meeting, New Orleans, Oct. 3-6.
15. Fussell, D.D. & Vanosik, J.L.: «An Iterative Sequence for Phase Equilibrium Calculations Incorporating the Redlich-Kwong EOS,» *SPEJ*, (June 1978) 173-82.
16. Katz, D.L.et al.: *Handbook of Natural Gas Engineering*, McGraw-Hill Book Co. Inc., New York City (1959).
17. Caraway, G.E., & Lowrey, L.L.: «Generating Flue Gas for Injection Releases Sales Gas,» *Oil & Gas J.* (July 28, 1975) 126-32.
18. Wilson, K.: «Enhanced Recovery Inert Gas Processes Compared,» *Oil & Gas J.* (July 31, 1978) 161-72.
19. Holm, L.W. & O'Brian, L.J.: «Carbon Dioxide Test at the Mead-Strawn Field,» *J. Pet. Tech.* (April 1971) 431-42.
20. Macon, R.S.: «Desing and Operation of the Levelland Unit CO₂ Injection Facility,» paper SPE 8410 presented at the 1979 SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Las Vegas, Sept. 23-26.
21. Hare, M. et al.: «Sources and Delivery of Carbon Dioxide for Enhanced Oil Recovery, Report FE-2515-24 prepared by Pullman Kellogg Co., Houston, for the U.S. DOE, Contract EX-76-C-01-2515 (Dec. 1978).

22. Moscrip, R. III: «Butane Injection in San Pedro Block D,» Pet. Eng. (Sept 1958) B-10-B-24.
23. Jenks, L.H., Campell, B.J., Binder, G.G.Jr.: «A Field Test of the Gas-Driven Liquid Propane Method of Oil Recovery,» Trans., AIME (1957) 210, 34-39.
24. Stalkup E.T. : «Miscible Displacement» Monograph Series 1984,112-13.
25. Meltzer, B.D., Hurble, J.M. & Cassingham, R.W.: «An Efficient Gas Displacement Project-Raleigh Field, Mississippi,» J. Pet. Tech. (May 1965) 509-14.
26. Lackland, S.D. & Hurford, G.T.: «Advanced Technology Improves Recovery in Fairway,» paper SPE 3773 presented at the 1972 SPE Improved Oil Recovery Symposium, Tulsa April 16-19, 1972.
27. Harby, J.H. & Robertson, N.: «Miscible Displacement by High-Pressure Gas at Block 31,» Pet. Eng. (Nov 1975) 24-28.
28. Herbeck, E.R. & Blanton, J.R.: «Ten Years of Miscible Displacement of Block 31 Field,» J. Pet. Tech. (June 1961) 543-49.
29. Holm, L.W. & Josental, V.A.: «Mechanism of Oil Displacement by Carbon Dioxide,» J. Pet. Tech. (Dec. 1974) 1427-36.
30. Holm, L.W. & Josental, V.A.: «Effect of Oil Composition on Miscible-Type Displacement by Carbon Dioxide,» SPE J. (Feb 1982) 87-98.
31. Thrash, J.C.: «Twofreds Field - Tertiary Oil Recovery Project,» paper SPE 8382 presented at the 1979 SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Las Vegas, Sept. 23-26.
32. Pontious, S.B. & Tham, M.J.: «North Cross (Devonian) Unit CO₂ Flood - Review of Flood Performance and Numerical Simulation Model,» J. Pet. Tech. (April 1978) 1706-16.
33. Stright, D.H. Jr. et al.: «Carbon Dioxide Injection Into Undersaturated Viscous Reservoirs - Simulation and Field Application,» J. Pet. Tech. (Oct. 1977) 1248-258.
34. Reid, T.B. & Robinson, H.J.: «Lick Creek Meakin Sand Unit Immiscible CO₂-Waterflood Project,» paper SPE 9795 presented at the 1981 SPE Enhanced Oil Recovery Symposium, Tulsa April 5-8.
35. McRee, B.C.: «CO₂: How it Works, Where it Works,» Pet. Eng. Intl. (Nov. 1977) 52-63.
36. Rowe, H.G., York S.D., Ader, J.C.: «Slaughter Estate Unit Tertiary Pilot Performance
37. Kane, A.V.: «Performance Review of a Large Scale CO₂-Wag Project SACROC Unit-Kelly Sneider Field,» J. Pet. Tech. (Dec. 1978) 217-31.
38. Johnston, J.W.: «A Rewiew of the Willard (San Andres) Unit CO₂ Injection Project,» paper SPE 6388 presented at the 1977 SPE Permian Basin Oil and Gas Recovery Conference, Midland, TX, March 10-11.
39. Kennedy, J.T. & Thodos, G.: «The Transport Properties of Carbon Dioxide,» AiChE J. (Dec. 1961)7,625.
40. Enhanced Oil Recovery - An Analysis of the Potential for Enhanced Oil Recovery from Known Fields in the United States - 1976 to 2000, Natl. Petroleum Council, Washington, DC (Dec. 1976).
41. The Potential and Economics of Enhanced Oil Recovery, Report prepared by Lewin & Assocs. Inc. For U.S. DOE (April 1976).
42. Enhanced Oil Recovery Potential in the U.S., Office of Technology Assesment, U.S. Congress, Washington, DC (Jan. 1978).
43. Johnson, J.P. & Pollin, J.S.: «Measurement and Corellation of CO₂ Miscible Pressures,» paper SPE 9790 presented at the 1981 SPE Enhanced Oil Recovery Symposium, Tulsa April 5-8.

44. Lee, J.L.: « Effectiveness of Carbon Dioxide Displacements Under Miscible and Immiscible Conditions,» Research Report RR 40, Petroleum Recovery inst., Calgary (March 1979).
45. Coan, S.W., «Profitable Miscible Flood in a Watered Out Reservoir,» Oil & Gas J. (Dec 12, 1966) 111.
46. Improved Oil Recovery Field Reports, SPE, Dallas (1975-1981).
47. Orr, F.M. & Silva, M.K.: «Equilibrium Phase Composition of CO₂ Hydrocarbon Mixtures Measurement by a Continious Multiple Contact Experiment,» paper SPE 10796 presented at the 1982 SPE/DOE Enhanced Oil Recovery Symposium, Tulsa April 4-7.
48. Fussell, L.T.: «A Technique for Calculating Multiphase Equilibria,» SPEJ (Aug. 1979) 203-08
49. Sherwood, T.K. & Pigford, R.L.: «Absorption & Extraction,» McGraw-Hill Book Co. Inc, New York Sity (1952) 52-53.
50. Yellig, W.F. & Metcalfe. R.S.: «Determination and Prediction of CO₂ Minimum Miscibility Pressures,» JPT (Jan 1980) 160-68.
51. Henry, R.L. & Metcalfe. R.S.: «Multiple Phase Generation During CO₂ Flooding ,» paper SPE 8812 presented at the 1980 SPE/DOE Enhanced Oil Recovery Symposium, Tulsa April 20-23.
52. Stalkup E.T. : «Miscible Displacement» Monograph Series 1984,77
53. Peng, D.Y. & Robinson, D.B.: «A New Two-Constant Equation of State,» Ind. Eng. Chem. Fund. (1976) 15, 59-64.
54. Kuo, S.S.: «Prediction of Miscibility for the Enriched-Gas Drive Process,» paper SPE 14152 presented at the 60th Annual Technical Conference & Exhdition of the SPE, (1985) Las Vegas, Sep. 22-25.
55. Zick, A.A.: «A Combined Condensing/Vaporizing Mechanism in the Displacement of Oil by Enriched Gases,» paper SPE 15493 presented at the 61th Annual Technical Conference & Exhdition of the SPE, (1986) New York, Oct. 5-8.
56. Benmekki, E.H. & Mansoori, G.A.: «Minimum Miscibility Pressure Prediction With Equations of State,» paper SPERE 15677 (May 1988) 559-64
57. Nouar, A. & Flock, D.L.: «Prediction of Minimum Miscibility Pressure of a Vaporizing Gas Drive,» paper SPERE 15075 (Feb. 1988) 182-98.
58. Varotsis, N., : «A Robust Prediction Method for Rapid- Phase Behavior Calculations» , SPERE, May 1989, 237 - 243.
59. Stalkup E.T. : «Miscible Displacement» Monograph Series 1984,156

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

Στο παράρτημα Α περιέχονται οι υπορουτίνες που κατασκευάσθηκαν σε γλώσσα FORTRAN77 και χρησιμοποιήθηκαν μαζί με υπορουτίνες από το πρόγραμμα **VALUE** για την δημιουργία του προγράμματος **MMP**.

ΥΠΟΡΟΥΤΙΝΑ DPRE1

SUBROUTINE DPRE1 (SPRE, PREARX, BUBP)

```

COMMON/KK12/KK1, KK2
COMMON/CONDF/PRE, TEMPF
COMMON/PRESSURE/DPRE, PREMAXIM, PREMINIM, PREMMISC
COMMON/VAL/AALK (60)
COMMON/ZKVAL/ZZ (60)
COMMON/INTE/NPU, NPS, NC
COMMON/VVV/VL (60), VV (60)
COMMON/VLATEK/VVVALK (60)

PREMMISC=0
SPRE=SPRE/2
KK1=1
IF (PRE.EQ.BUBP+10) THEN
    PREMMISC=PRE
    GOTO 10
ENDIF
PRE=PREARX+SPRE+5
IF (SPRE.LT.3.) THEN
    PREMMISC=PRE
    GOTO 10
ENDIF
DO 100 I=1, NC
    VL (I) =ZZ (I)
    VVVALK (I) =AALK (I)
100 CONTINUE
10 CONTINUE
RETURN

```

END

ΥΠΟΡΟΥΤΙΝΑ KVALPRE

SUBROUTINE KVALPRE (KNPRE, SPRE, PREARX)

```

COMMON/KK12/KK1, KK2
COMMON/INTE/NPU, NPS, NC
COMMON/CONDF/PRE, TEMPF
COMMON/OLD/VALKOLD (100)
COMMON/VLATEK/VVVALK (60)
COMMON/VAL/AALK (60)
COMMON/ZKVAL/ZZ (60)
COMMON/VVV/VL (60), VV (60)

KNPRE=0
KVALSAME=0
DO 10 I=1, NC
    IF (VALKOLD (I) *0.999.LT.VVVALK (I) .AND.VVVALK (I)
&      .LT.VALKOLD (I) *1.001) THEN
        KVALSAME=KVALSAME+1
    ENDIF
    VALKOLD (I) =VVVALK (I)
10  CONTINUE
    IF (KVALSAME.GE.NC) THEN
        PREARX=PRE
        PRE=PRE+SPRE+5
        KNPRES=1
        DO 100 I=1, NC
            ZZ (I) =VL (I)
            AALK (I) =VVVALK (I)
100  CONTINUE
            DO 70 I=1, NC
                VALKOLD (I) =5.
70  CONTINUE
    ENDIF
    RETURN
END
```

ΥΠΟΡΟΥΤΙΝΑ TRIVTEST

SUBROUTINE TRIVTEST (KTTRR, LESTIM, KTRIV)

```

COMMON/CONDF/PRE,TEMPF

PREOLD=PRE
KTRIV=1
XPRES=2000.
DO 10 I=1,7
    XPRES=XPRES/2
    PRE=PREOLD-XPRES
    KTRIV=KTRIV+1
    CALL FLASH(KTTRR,LESTIM,KTRIV)
    IF(LESTIM.NE.0) THEN
        LESEIM=2
        GOTO 100
    ENDIF
    CALL ESTIMATION(LESTIM)
    IF(LESTIM.NE.0) THEN
        LESEIM=2
        GOTO 100
    ENDIF
10  CONTINUE
PRE=PREOLD
CALL FLASH(KTTRR,LESTIM,KTRIV)
IF(LESTIM.NE.0) THEN
    LESEIM=2
    GOTO 100
ENDIF
CALL ESTIMATION(LESTIM)
IF(LESTIM.NE.0) THEN
    LESEIM=2
    GOTO 100
ENDIF
100 CONTINUE
KTRIV=0
END

```

ΥΠΟΡΟΥΤΙΝΑ READF

SUBROUTINE READF(iii)

C

C *** Reads an already written data file ***

C

```

      CHARACTER*26 JEDIT,BEDIT
      CHARACTER*10 NAME
      CHARACTER*5 TITPS0
      CHARACTER*1 IPNA0,IOPT,INIT

      COMMON/INTE0/NPU0(2),NPS0(2),NC0(2)
      COMMON/Comp0/z0(60,2),icomp0(30,2)

COMMON/PROP0/WT0(60,2),TC0(60,2),PC0(60,2),OMEGA0(60,2)

COMMON/PLUS0/TB0(30,2),PSMW0(30,2),PSSG0(30,2),WKB0(30,2)
      COMMON/NNCC0/NCAR0(30,2),IPNA0(30,2)
      COMMON/TIT0/Titps0(30,2)
      COMMON/MOD/TCMOD,PCMOD,IOPT
      COMMON/NAN/NAME(2)
      COMMON/JEPNA/JEDIT(10),INIT(10),BEDIT

      OPEN(2,ERR=3000,FILE=NAME(iii),STATUS='OLD')

      READ(2,9000)Npu0(iii)
      READ(2,9000)Nps0(iii)
      Nc0(iii)=Npu0(iii)+Nps0(iii)
      DO 2000 I=1,Npu0(iii)
          READ(2,9000)Icomp0(I,iii)
2000      CONTINUE
      READ(2,9012)IOPT
      DO 2450 I=1,Nps0(iii)
          READ(2,9001)TITPS0(I,iii)
          READ(2,9011)NCAR0(I,iii)
          READ(2,9012)IPNA0(I,iii)
          READ(2,9003)Psmw0(I,iii)
          READ(2,9004)Pssg0(I,iii)
2450      CONTINUE
          READ(2,9004) (Z0(I,iii),I=1,Npu0(iii))
          READ(2,9004) (Z0(Npu0(iii)+I,iii),I=1,Nps0(iii))
          READ(2,9003) (Wt0(I,iii),I=1,Npu0(iii))
          READ(2,9003) (Wt0(Npu0(iii)+I,iii),I=1,Nps0(iii))

```

```

      READ (2, 9003) (Tb0 (I, iii), I=1, Nps0 (iii))
      READ (2, 9003) (TC0 (I, iii), I=1, Npu0 (iii))
      READ (2, 9003) (TC0 (Npu0 (iii)+I, iii), I=1, Nps0 (iii))
      READ (2, 9003) (PC0 (I, iii), I=1, Npu0 (iii))
      READ (2, 9003) (PC0 (Npu0 (iii)+I, iii), I=1, Nps0 (iii))
      READ (2, 9004) (Omega0 (I, iii), I=1, Npu0 (iii))
      READ (2, 9004)
      (Omega0 (Npu0 (iii)+I, iii), I=1, Nps0 (iii))
      READ (2, 9004) TCMOD
      READ (2, 9004) PCMOD
      READ (2, 9005) BEDIT
3000  CONTINUE
      CLOSE (UNIT=2)
9000  FORMAT (5X, I4)
9001  FORMAT (5X, A5)
9003  FORMAT (5X, F9.3)
9004  FORMAT (5X, F9.5)
9005  FORMAT (A26)
9010  FORMAT (I4)
9011  FORMAT (I4)
9012  FORMAT (A5)
      END

```

ΥΠΟΡΟΥΤΙΝΑ WRITEF

```

      SUBROUTINE WRITEF (iii)
      CHARACTER*26 JEDIT, BEDIT
      CHARACTER*10 NAME
      CHARACTER*5 TITPS0
      CHARACTER*1 IPNA0, IOPT, INIT

      COMMON/INTE0/NPU0 (2), NPS0 (2), NC0 (2)
      COMMON/Comp0/z0 (60, 2), icomp0 (30, 2)

      COMMON/PROP0/WT0 (60, 2), TC0 (60, 2), PC0 (60, 2), OMEGA0 (60, 2)

      COMMON/PLUS0/TB0 (30, 2), PSMW0 (30, 2), PSSG0 (30, 2), WKB0 (30, 2)
      COMMON/NNCC0/NCAR0 (30, 2), IPNA0 (30, 2)
      COMMON/TIT0/Titps0 (30, 2)
      COMMON/MOD/TCMOD, PCMOD, IOPT
      COMMON/NAN/NAME (2)

```

```

COMMON/JEPNA/JEDIT(10),INIT(10),BEDIT

OPEN(2,ERR=3000,FILE=NAME(iii),STATUS='NEW')

WRITE(2,9000)Npu0(iii)
WRITE(2,9000)Nps0(iii)
DO 2000 I=1,Npu0(iii)
    WRITE(2,9000)Icomp0(I,iii)
2000  CONTINUE
WRITE(2,9012)IOPT
DO 2450 I=1,Nps0(iii)
WRITE(2,9001)TITPS0(I,iii)
WRITE(2,9011)NCAR0(I,iii)
WRITE(2,9012)IPNA0(I,iii)
WRITE(2,9003)Psmw0(I,iii)
WRITE(2,9004)Pssg0(I,iii)
2450  CONTINUE
WRITE(2,9004) (Z0(I,iii),I=1,Npu0(iii))
WRITE(2,9004) (Z0(Npu0(iii)+I,iii),I=1,Nps0(iii))
WRITE(2,9003) (Wt0(I,iii),I=1,Npu0(iii))
WRITE(2,9003) (Wt0(Npu0(iii)+I,iii),I=1,Nps0(iii))
WRITE(2,9003) (Tb0(I,iii),I=1,Nps0(iii))
WRITE(2,9003) (TC0(I,iii),I=1,Npu0(iii))
WRITE(2,9003) (TC0(Npu0(iii)+I,iii),I=1,Nps0(iii))
WRITE(2,9003) (PC0(I,iii),I=1,Npu0(iii))
WRITE(2,9003) (PC0(Npu0(iii)+I,iii),I=1,Nps0(iii))
WRITE(2,9004) (Omega0(I,iii),I=1,Npu0(iii))
WRITE(2,9004)
(Omega0(Npu0(iii)+I,iii),I=1,Nps0(iii))
WRITE(2,9004) TCMOD
WRITE(2,9004) PCMOD
WRITE(2,9005) BEDIT
3000  CONTINUE
CLOSE(UNIT=2)
9000  FORMAT(5X,I4)
9001  FORMAT(5X,A5)
9003  FORMAT(5X,F9.3)
9004  FORMAT(5X,F9.5)
9005  FORMAT(A26)

```

```

9010    FORMAT (I4)
9011    FORMAT (I4)
9012    FORMAT (A5)
      END

```

ΥΠΟΡΟΥΤΙΝΑ MIXGASOIL
SUBROUTINE MIXGASOIL (ee1, ee2, KMIX)

```

      CHARACTER*26 JEDIT, BEDIT
      CHARACTER*10 NAME
      CHARACTER*5 TITPS0
      CHARACTER*5 TITPS
      CHARACTER*1 IPNA0, IOPT, INIT
      CHARACTER*1 IPNA

      dimension mmp(30), mmps(30)

      COMMON/INTE0/NPU0(2), NPS0(2), NC0(2)
      COMMON/Comp0/z(60,2), icomp0(30,2)

      COMMON/PROP0/WT0(60,2), TC0(60,2), PC0(60,2), OMEGA0(60,2)

      COMMON/PLUS0/TB0(30,2), PSMW0(30,2), PSSG0(30,2), WKB0(30,2)
      COMMON/NNCC0/NCAR0(30,2), IPNA0(30,2)
      COMMON/TIT0/Titps0(30,2)
      COMMON/MOD/TCMOD, PCMOD, IOPT
      COMMON/NAN/NAME(2)
      COMMON/JEPNA/JEDIT(10), INIT(10), BEDIT
      COMMON/INTE/NPU, NPS, NC
      COMMON/Comp/z(60), icomp(30)
      COMMON/PROP/WT(60), TC(60), PC(60), OMEGA(60)
      COMMON/PLUS/TB(30), PSMW(30), PSSG(30), WKB(30)
      COMMON/NNCC/NCAR(30), IPNA(30)
      COMMON/TIT/Titps(30)
      COMMON/ZKVAL/ZZ(60)

      ikir=0
      do 100 i=1, npu0(2)
        mmp(i)=0

```

```

100  continue
      do 200 ii=1,npu0(1)
        do 250 j=1,npu0(2)
          if(icom0(ii,1).eq.icom0(j,2)) then
            z(ii)=z0(ii,1)*ee1+z0(j,2)*ee2
CCC4      write(*,*)'z ',ii,' = ',z(ii)
            mmpp(j)=j
            goto 202
          else
            endif
250    continue
        z(ii)=z0(ii,1)*ee1
202    continue
        tc(ii)=tc0(ii,1)
        pc(ii)=pc0(ii,1)
        omega(ii)=omega0(ii,1)
        icom(ii)=icom0(ii,1)
        wt(ii)=wt0(ii,1)
200    continue
        irir=0
      do 300 j=1,npu0(2)
        if(mmpp(j).ne.0) then
          goto 300
        else
          irir=irir+1
          z(irir+npu0(1))=z0(j,2)*ee2
          tc(irir+npu0(1))=tc0(j,2)
          pc(irir+npu0(1))=pc0(j,2)
          omega(irir+npu0(1))=omega0(j,2)
          icom(irir+npu0(1))=icom0(j,2)
          wt(irir+npu0(1))=wt0(j,2)
        endif
300    continue
        ikir=irir+npu0(1)
        do 101 i=1,nps0(2)
          mmps(i)=0
101    continue
        do 201 ii=1,nps0(1)
          do 251 j=1,nps0(2)

```

```

        if (titps0(ii,1).eq.titps0(j,2)) then
            z(ikir+ii)=z0(npu0(1)+ii,1)*ee1
& +z0(npu0(2)+j,2)*ee2
            mmps(j)=j
            goto 203
        else
            endif
251    continue
        z(ikir+ii)=z0(npu0(1)+ii,1)*ee1
203    continue
        tc(ikir+ii)=tc0(npu0(1)+ii,1)
        pc(ikir+ii)=pc0(npu0(1)+ii,1)
        omega(ikir+ii)=omega0(npu0(1)+ii,1)
        titps(ii)=titps0(ii,1)
        ncar(ii)=ncar0(ii,1)
        ipna(ii)=ipna0(ii,1)
        WKB(ii)=WKB0(ii,1)
        tb(ii)=tb0(ii,1)
        pssg(ii)=pssg0(ii,1)
        psmw(ii)=psmw0(ii,1)
        wt(ikir+ii)=wt0(npu0(1)+ii,1)
201    continue
        irri=0
        do 301 j=1,nps0(2)
            if (mmps(j).ne.0) then
                goto 301
            else
                irri=irri+1
                z(ikir+nps0(1)+irri)=z0(npu0(2)+j,2)*ee2
                tc(ikir+nps0(1)+irri)=tc0(npu0(2)+j,2)
                pc(ikir+nps0(1)+irri)=pc0(npu0(2)+j,2)
                omega(ikir+nps0(1)+irri)=omega0(npu0(2)+j,2)
                titps(nps0(1)+irri)=titps0(j,2)
                ncar(nps0(1)+irri)=ncar0(j,2)
                ipna(nps0(1)+irri)=ipna0(j,2)
                WKB(nps0(1)+irri)=WKB0(j,2)
                tb(nps0(1)+irri)=tb0(j,2)
                pssg(nps0(1)+irri)=pssg0(j,2)
                psmw(nps0(1)+irri)=psmw0(j,2)

```

```

        wt(ikir+nps0(1)+irri)=wt0(npu0(2)+j,2)
    endif
301 continue
    npu=npu0(1)+irir
    nps=nps0(1)+irri
    nc=npu+nps
    call FWRITE
    IF (KMIX.EQ.1) THEN
        DO 50 I=1,NC
            ZZ(I)=Z(I)
50      CONTINUE
    ENDIF
    return
end

```

ΥΠΟΡΟΥΤΙΝΑ FWRITE

SUBROUTINE FWRITE

```

C
C *** Writes the MIXED data in a file ***
C
    CHARACTER*26 JEDIT,BEDIT
    character*5  mixgo
    CHARACTER*10 NAME
    CHARACTER*5 TITPS
    CHARACTER*1 IPNA0,IOPT,INIT
    CHARACTER*1 IPNA

    dimension mixgo(12)
    COMMON/INTE/NPU,NPS,NC
    COMMON/COMP/Z(60),ICOMP(30)
    COMMON/PROP/WT(60),TC(60),PC(60),OMEGA(60)
    COMMON/PLUS/TB(30),PSMW(30),PSSG(30),WKB(30)
    COMMON/TIT/TITPS(30)
    COMMON/NNCC/NCAR(30),IPNA(30)
    COMMON/MOD/TCMOD,PCMOD,IOPT
    COMMON/NAN/NAME(2)
    COMMON/JEPNA/JEDIT(10),INIT(10),BEDIT

    OPEN(2,ERR=3000,FILE='MIXGO',STATUS='NEW')

```

```

WRITE (2,9000)NPU
WRITE (2,9000)NPS
DO 2000 I=1,NPU
    WRITE (2,9000) ICOMP (I)
2000  CONTINUE
    WRITE (2,9012) IOPT
    DO 2450 I=1,NPS
        WRITE (2,9001) TITPS (I)
        WRITE (2,9011) NCAR (I)
        WRITE (2,9012) IPNA (I)
        WRITE (2,9003) PSMW (I)
        WRITE (2,9004) PSSG (I)
2450  CONTINUE
        WRITE (2,9004) (Z (I) , I=1, NPU)
        WRITE (2,9004) (Z (NPU+I) , I=1, NPS)
        WRITE (2,9003) (WT (I) , I=1, NPU)
        WRITE (2,9003) (WT (NPU+I) , I=1, NPS)
        WRITE (2,9003) (TB (I) , I=1, NPS)
        WRITE (2,9003) (TC (I) , I=1, NPU)
        WRITE (2,9003) (TC (NPU+I) , I=1, NPS)
        WRITE (2,9003) (PC (I) , I=1, NPU)
        WRITE (2,9003) (PC (NPU+I) , I=1, NPS)
        WRITE (2,9004) (OMEGA (I) , I=1, NPU)
        WRITE (2,9004) (OMEGA (NPU+I) , I=1, NPS)
        WRITE (2,9004) TCMOD
        WRITE (2,9004) PCMOD
        WRITE (2,9005) BEDIT
3000  CONTINUE
        CLOSE (UNIT=2)
9000  FORMAT (5X,I4)
9001  FORMAT (5X,A5)
9003  FORMAT (5X,F9.3)
9004  FORMAT (5X,F9.5)
9005  FORMAT (A26)
9010  FORMAT (I4)
9011  FORMAT (I4)
9012  FORMAT (A5)
        RETURN
    END

```

ΥΠΟΡΟΥΤΙΝΑ MIXDIPHASIC

SUBROUTINE MIXDIPHASIC (JJVAL, ee1, ee2,
& KKVAL, OOPREV, KTESTBP, JPRE)

character*1 propt

COMMON/CONDF/PRE, TEMPF

COMMON/UU/KUSEX

KKVAL=1

PROPT='B'

IF (JPRE.EQ.1) THEN

JJVAL=0

GOTO 50

ENDIF

IF (KUSEX.EQ.1) THEN

KTESTBP=0

JJVAL=1

GOTO 599

ENDIF

50

CONTINUE

CALL SATUR(PREBD)

IF (PREBD.EQ.2600.) THEN

PREBD=OOPREV

ENDIF

IF (PRE.GT.PREBD) THEN

IF (KTESTBP.EQ.0) THEN

KTESTBP=1

EE1=EE1-0.02

EE2=EE2+0.02

GOTO 599

ELSE

KTESTBP=0

EE1=EE1+0.02

EE2=EE2-0.02

ENDIF

ENDIF

IF (KTESTBP.EQ.1) THEN

EE1=EE1+0.02

```

        EE2=EE2-0.02
        KTESTBP=0
    ENDIF
    IF (PREBD.GT.PRE+10) THEN
        JJVAL=1
    ELSE
        JJVAL=2
        IF (EE1.GT.0.8) THEN
            KKVAL=2
            EE1=0.1
            EE2=0.9
        ELSE
            KKVAL=1
            EE1=EE1+0.1
            EE2=EE2-0.1
        ENDIF
    ENDIF
599    CONTINUE
    OOPREV=PREBD
    RETURN
END

```

ΥΠΟΡΟΥΤΙΝΑ CHANGE OIL
SUBROUTINE CHANGE OIL

```

    CHARACTER*26 JEDIT,BEDIT
    CHARACTER*10 NAME
    CHARACTER*5 TITPS0
    CHARACTER*5 TITPS
    CHARACTER*1 IPNA0,IOPT,INIT
    CHARACTER*1 IPNA

    COMMON/INTE0/NPU0(2),NPS0(2),NC0(2)
    COMMON/Comp0/z0(60,2),icomp0(30,2)

    COMMON/PROP0/WT0(60,2),TC0(60,2),PC0(60,2),OMEGA0(60,2)

    COMMON/PLUS0/TB0(30,2),PSMW0(30,2),PSSG0(30,2),WKB0(30,2)
    COMMON/NNCC0/NCAR0(30,2),IPNA0(30,2)
    COMMON/TIT0/Titps0(30,2)

```

```

COMMON/MOD/TCMOD,PCMOD,IOPT
COMMON/NAN/NAME(2)
COMMON/JEPNA/JEDIT(10),INIT(10),BEDIT

COMMON/INTE/NPU,NPS,NC
COMMON/Comp/z(60),icomp(30)
COMMON/PROP/WT(60),TC(60),PC(60),OMEGA(60)
COMMON/PLUS/TB(30),PSMW(30),PSSG(30),WKB(30)
COMMON/NNCC/NCAR(30),IPNA(30)
COMMON/TIT/Titps(30)
COMMON/VVV/VL(60),VV(60)

      do 100 i=1,nc
        z0(i,2)=vl(i)
        wt0(i,2)=wt(i)
        tc0(i,2)=tc(i)
        pc0(i,2)=pc(i)
        omega0(i,2)=omega(i)
100    continue
        npu0(2)=npu
        nps0(2)=nps
        nc0(2)=nc
        do 200 i=1,nps
          tb0(i,2)=tb(i)
          psmw0(i,2)=psmw(i)
          pssg0(i,2)=pssg(i)
          titps0(i,2)=titps(i)
          ncar0(i,2)=ncar(i)
          ipna0(i,2)=ipna(i)
200    continue
          do 300 i=1,npu
            icomp0(i,2)=icomp(i)
300    continue
      return
      end

```

ΥΠΟΡΟΥΤΙΝΑ STARTOIL

SUBROUTINE STARTOIL(KSTARTOIL)

CHARACTER*26 JEDIT,BEDIT

```

CHARACTER*10 NAME
CHARACTER*5 TITPS0
CHARACTER*5 TITPS
CHARACTER*1 IPNA0, IOPT, INIT
CHARACTER*1 IPNA

```

```

COMMON/INTE0/NPU0(2), NPS0(2), NC0(2)
COMMON/Comp0/z0(60,2), icomp0(30,2)

```

```

COMMON/PROP0/WT0(60,2), TC0(60,2), PC0(60,2), OMEGA0(60,2)

```

```

COMMON/PLUS0/TB0(30,2), PSMW0(30,2), PSSG0(30,2), WKB0(30,2)
COMMON/NNCC0/NCAR0(30,2), IPNA0(30,2)
COMMON/TIT0/Titps0(30,2)
COMMON/MOD/TCMOD, PCMOD, IOPT
COMMON/NAN/NAME(2)
COMMON/JEPNA/JEDIT(10), INIT(10), BEDIT

```

```

COMMON/INTE/NPU, NPS, NC
COMMON/Comp/z(60), icomp(30)
COMMON/PROP/WT(60), TC(60), PC(60), OMEGA(60)
COMMON/PLUS/TB(30), PSMW(30), PSSG(30), WKB(30)
COMMON/NNCC/NCAR(30), IPNA(30)
COMMON/TIT/Titps(30)
COMMON/VVV/VL(60), VV(60)

```

```

      DIMENSION ZOIL(60), WTOIL(60), TCOIL(60), PCOIL(60)
      DIMENSION                                OMEGAOIL(60), TBOIL(60),
PSMWOIL(60), PSSGOIL(60)
      DIMENSION                                TITPSOIL(60), NCAROIL(60),
IPNAOIL(60), ICOMPOIL(60)

```

```

IF (KSTARTOIL.EQ.1) THEN
      npuOIL =npu0(2)
      npsOIL= nps0(2)
      ncOIL= nc0(2)
      do 100 i=1,ncOIL
            ZOIL(i)=Z0(i,2)
            wtOIL(i)= wt0(i,2)

```

```

        tcOIL(i) =tc0(i,2)
        pcOIL(i)= pc0(i,2)
        omegaOIL(i)= omega0(i,2)
100    continue
        do 200 i=1,npsOIL
            tbOIL(i) =tb0(i,2)
            psmwOIL(i)= psmw0(i,2)
            pssgOIL(i) =pssg0(i,2)
            titpsOIL(i)= titps0(i,2)
            ncarOIL(i)= ncar0(i,2)
            ipnaOIL(i) =ipna0(i,2)
200    continue
        do 300 i=1,npuOIL
            icompOIL(i)= icomp0(i,2)
300    continue

    ELSE

        npu0(2)=npuOIL
        nps0(2)=npsOIL
        nc0(2)=ncOIL
        do 10 i=1,ncOIL
            z0(i,2)=ZOIL(i)
            wt0(i,2)=wtOIL(i)
            tc0(i,2)=tcOIL(i)
            pc0(i,2)=pcOIL(i)
            omega0(i,2)=omegaOIL(i)
10    continue
        do 20 i=1,npsOIL
            tb0(i,2)=tbOIL(i)
            psmw0(i,2)=psmwOIL(i)
            pssg0(i,2)=pssgOIL(i)
            titps0(i,2)=titpsOIL(i)
            ncar0(i,2)=ncarOIL(i)
            ipna0(i,2)=ipnaOIL(i)
20    continue
        do 30 i=1,npuOIL
            icomp0(i,2)=icompOIL(i)
30    continue
    ENDIF

```

```

return
end

```

ΥΠΟΡΟΥΤΙΝΑ ESTIMATION
SUBROUTINE ESTIMATION(LESTIM)

```

COMMON/INTE/NPU,NPS,NC
COMMON/FUG/VALK(60),FIL(60),FIV(60),SFF(60)
COMMON/RESTIM/RESTIM
COMMON/CONDF/PRE,TEMPF
COMMON/NCF/FNC
LESTIM=0
RESTIM=0
KESTIM=0
DO 100 I=1,NC
    RESTIM=RESTIM+ABS(VALK(I)-1)
    IF(0.9.LT.VALK(I).AND.VALK(I).LT.1.1) THEN
        KESTIM=KESTIM+1
    ENDIF
100 CONTINUE
RTRIVIAL=NC*0.1
IF (RESTIM.LT.RTRIVIAL.AND.KESTIM.EQ.NC) THEN
    IF (FNC.GT.0) THEN
        LESTIM=2
    ELSE
        LESTIM=3
    ENDIF
ELSE
    ENDIF
RETURN
END

```

ΥΠΟΡΟΥΤΙΝΑ APICON1
SUBROUTINE APICON1

```

COMMON/Comp0/z0(60,2),icomp0(30,2)
COMMON/INTE0/NPU0(2),NPS0(2),NC0(2)
    dimension aa(2),bb(2),cc(2),xx(2),yy(2)
do 100 iii=1,2

```

```

aa(iii)=0
bb(iii)=0
cc(iii)=0
do 3334 i=1,npu0(iii)
    do 3335 j=1,4
        if(icompo(i,iii).eq.j) then
            aa(iii)=aa(iii)+z0(i,iii)
        else
            endif
3335        continue
3334    continue
do 3336 i=1,npu0(iii)
    do 3337 j=5,11
        if(icompo(i,iii).eq.j) then
            bb(iii)=bb(iii)+z0(i,iii)
        else
            endif
3337        continue
3336    continue
    CC(iii)=1-AA(iii)-BB(iii)
    xx(iii)=(1-cc(iii)+bb(iii))/2
    yy(iii)=aa(iii)*0.8660254
    WRITE (10,101)Xx(iii),YY(iii)
101    FORMAT(2(1X,F8.6))
100    continue
    RETURN
    END

```

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

Στο παράρτημα Β περιέχονται οι μακροεντολές που κατασκευάστηκαν μέσω του λογιστικού πακέτου MSEXCEL και χρησιμοποιήθηκαν για την δημιουργία των ψευδοτριαδικών διαγραμμάτων και των διαγραμμάτων συντελεστών ισορροπίας για όλα τα πειράματα που αναφέρθηκαν στην παρούσα εργασία.

MISC3 MACRO

Η μακροεντολή **MISC3** δημιουργεί ψευδοτριαδικά διαγράμματα με στοιχεία που εισάγει από τα αρχεία αποτελεσμάτων του προγράμματος **MMP**.

```
Sub MISC3()
    Worksheets.OpenText
    Filename:="C:\uniprogs\sot\mmp\test1\R
    ESULTS.", Origin:= _
        xlMSDOS, StartRow:=1,
    DataType:=xlFixedWidth,
    FieldInfo:=Array _
        (Array(0, 1), Array(9, 1),
        Array(18, 1), Array(27, 1), Array(36, 1),
        Array(45, _
            1), Array(54, 1))
    ChDir
    "C:\uniprogs\sot\mmp\test1"
    Charts.Add
```

```

ActiveChart.ChartWizard
Source:=Sheets("RESULTS").Range("A
1:B2"), _
    Gallery:=xlXYScatter,
Format:=2, PlotBy:=xlColumns, _
    CategoryLabels:=1,
SeriesLabels:=0,    HasLegend:=1,
Title:="", _
    CategoryTitle:="",
ValueTitle:="", ExtraTitle:=""
ActiveChart.PlotArea.Select
With Selection.Border
    .ColorIndex = 16
    .Weight = xlThin
    .LineStyle = xlContinuous
End With
With Selection.Interior
    .ColorIndex = 2
    .PatternColorIndex = 1
    .Pattern = xlSolid
End With

ActiveChart.Axes(xlValue).Select
With Selection.Border
    .Weight = xlHairline
    .LineStyle = xlNone
End With
With Selection
    .MajorTickMark = xlNone
    .MinorTickMark = xlNone
    .TickLabelPosition = xlNone
End With
With ActiveChart.Axes(xlValue)
    .MinimumScale = 0

```

```

    .MaximumScale = 0.8660254
    .MinorUnitIsAuto = True
    .MajorUnitIsAuto = True
    .Crosses = xlAutomatic
    .ReversePlotOrder = False
    .ScaleType = False
End With

ActiveChart.Axes(xlCategory).Select
With Selection.Border
    .Weight = xlHairline
    .LineStyle = xlNone
End With
With Selection
    .MajorTickMark = xlNone
    .MinorTickMark = xlNone
    .TickLabelPosition = xlNone
End With
With
ActiveChart.Axes(xlCategory)
    .MinimumScale = 0
    .MaximumScale = 1
    .MinorUnitIsAuto = True
    .MajorUnitIsAuto = True
    .Crosses = xlAutomatic
    .ReversePlotOrder = False
    .ScaleType = False
End With

ActiveChart.SeriesCollection(1).Select
With Selection.Border
    .ColorIndex = 1
    .Weight = xlThin
    .LineStyle = xlContinuous

```

```

End With
With Selection

.MarkerBackgroundColorIndex = 1

.MarkerForegroundColorIndex = 1
.MarkerStyle = xlX
.Smooth = False
End With
With
ActiveChart.SeriesCollection(1)
.Name = """"START""""
.Values = "=RESULTS!R1C2:R2C2"
End With
ActiveChart.PlotArea.Select

ActiveChart.SeriesCollection.Extend
Source:="RESULTS!$A$4:$B$1000", _
Rowcol:=xlColumns,
CategoryLabels:=True

ActiveChart.SeriesCollection(1).Select
With Selection.Border
.ColorIndex = 1
.Weight = xlThin
.LineStyle = xlContinuous
End With
With Selection

.MarkerBackgroundColorIndex = 1

.MarkerForegroundColorIndex = 1
.MarkerStyle = xlCircle
.Smooth = False

```

```

End With

ActiveChart.SeriesCollection(1).XValues
= "=RESULTS!R4C1:R1000C1"
With
ActiveChart.SeriesCollection(1)
.Name = """"FEED""""
.Values = "=RESULTS!R4C2:R1000C2"
End With

ActiveChart.SeriesCollection.Add
Source:="RESULTS!$A$1:$B$2",
Rowcol _
:=xlColumns,
SeriesLabels:=False,
CategoryLabels:=False, _
Replace:=False

ActiveChart.SeriesCollection(3).Select
Selection.Delete

ActiveChart.SeriesCollection(2).Select
With Selection.Border
.ColorIndex = 1
.Weight = xlThin
.LineStyle = xlContinuous
End With
With Selection

.MarkerBackgroundColorIndex = 1

.MarkerForegroundColorIndex = 1
.MarkerStyle = xlX
.Smooth = False

```

End With

```
ActiveChart.SeriesCollection(2).XValues
= "=RESULTS!R1C1:R2C1"
```

With

```
ActiveChart.SeriesCollection(2)
    .Name = "=""START""
    .Values =
"=RESULTS!R1C2:R2C2"
```

End With

ActiveChart.PlotArea.Select

```
ActiveChart.SeriesCollection.Add
Source:="RESULTS!$C$4:$D$1000",
Rowcol _
    :=xlColumns,
SeriesLabels:=False,
CategoryLabels:=False, _
    Replace:=False
```

```
ActiveChart.SeriesCollection(3).Select
Selection.Delete
```

```
ActiveChart.SeriesCollection(3).Select
    With Selection.Border
        .Weight = xlThin
        .LineStyle = xlNone
    End With
    With Selection
```

.MarkerBackgroundColorIndex = 5

```
.MarkerForegroundColorIndex = 5
    .MarkerStyle = xlCircle
    .Smooth = False
```

End With

```
ActiveChart.SeriesCollection(3).XValues
= "=RESULTS!R4C3:R1000C3"
```

With

```
ActiveChart.SeriesCollection(3)
    .Name = "=""LIQUID""
    .Values =
"=RESULTS!R4C4:R1000C4"
```

End With

ActiveChart.SeriesCollection(1).Select

```
With Selection.Border
    .Weight = xlThin
    .LineStyle = xlNone
End With
With Selection
```

.MarkerBackgroundColorIndex = 1

```
.MarkerForegroundColorIndex = 1
    .MarkerStyle = xlCircle
    .Smooth = False
End With
```

```
ActiveChart.SeriesCollection.Add
Source:="RESULTS!$E$4:$F$1000",
Rowcol _
    :=xlColumns,
SeriesLabels:=False,
CategoryLabels:=False, _
    Replace:=False
```

```
ActiveChart.SeriesCollection(4).Select
Selection.Delete
```

		ActiveCell.FormulaR1C1 =
ActiveChart.SeriesCollection(4).Select	"1"	
With Selection.Border		Range("I4").Select
.Weight = xlThin		ActiveCell.FormulaR1C1 = "0"
.LineStyle = xlNone		Range("I5").Select
End With		Sheets("Γράφημα1").Select
With Selection		
		ActiveChart.SeriesCollection.Add
.MarkerBackgroundColorIndex = 3		Source:="RESULTS!\$H\$2:\$I\$4",
		Rowcol _
		:=xlColumns,
.MarkerForegroundColorIndex = 3		SeriesLabels:=False,
.MarkerStyle = xlCircle		CategoryLabels:=False, _
.Smooth = False		Replace:=False
End With		
ActiveChart.SeriesCollection(4).XValues		ActiveChart.SeriesCollection(6).Select
= "RESULTS!R4C5:R1000C5"		
With		ActiveChart.SeriesCollection(5).Select
ActiveChart.SeriesCollection(4)		Selection.Delete
.Name = "=""VAPOR"""		
.Values =		ActiveChart.SeriesCollection(5).Select
"RESULTS!R4C6:R1000C6"		
End With		ActiveChart.SeriesCollection(5).Points(3
Sheets("RESULTS").Select		).Select
Range("H2").Select		ActiveChart.PlotArea.Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "0"		
Range("I2").Select		ActiveChart.SeriesCollection(5).Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "0"		With Selection.Border
Range("H3").Select		.ColorIndex = 1
ActiveCell.FormulaR1C1 =		.Weight = xlThin
"0.5"		.LineStyle = xlContinuous
Range("I3").Select		End With
ActiveCell.FormulaR1C1 =		With Selection
"0.8660254"		
Range("H4").Select		.MarkerBackgroundColorIndex = 30

```
.MarkerForegroundColorIndex = 30
    .MarkerStyle = xlNone
    .Smooth = False
End With
```

```
ActiveChart.SeriesCollection(5).XValues
= "=RESULTS!R2C8:R4C8"
```

```
    Sheets("Γράφημα1").Select
    Sheets("Γράφημα1").Name =
"PSEUDOTERNARY DIAGRAMM"
    ActiveChart.PlotArea.Select
    With
```

```
ActiveChart.TextBoxes.Add(362, 219,
435, 235)
```

```
    .Select
    .AutoSize = True
    .Text = "C1,CO2,N2,H2S"
End With
```

```
Selection.Font.Bold = True
With Selection.Font
```

```
    .Name = "Arial Greek"
    .FontStyle = "Bold"
    .Size = 12
    .Strikethrough = False
    .Superscript = False
    .Subscript = False
    .OutlineFont = False
    .Shadow = False
    .Underline = xlNone
    .ColorIndex = xlAutomatic
    .Background =
```

```
xlTransparent
```

```
End With
```

```
ActiveChart.DrawingObjects("Text
1").Select
```

```
Selection.Left = 351.4
Selection.Top = 16.1
ActiveChart.PlotArea.Select
With
```

```
ActiveChart.TextBoxes.Add(362, 219,
395, 235)
```

```
    .Select
    .AutoSize = True
    .Text = "C2,C6"
```

```
End With
Selection.Font.Bold = True
With Selection.Font
```

```
    .Name = "Arial Greek"
    .FontStyle = "Bold"
    .Size = 12
    .Strikethrough = False
    .Superscript = False
    .Subscript = False
    .OutlineFont = False
    .Shadow = False
    .Underline = xlNone
    .ColorIndex = xlAutomatic
    .Background =
```

```
xlTransparent
```

```
End With
```

```
ActiveChart.DrawingObjects("Text
2").Select
```

```
Selection.Left = 575.4
Selection.Top = 409.3
ActiveChart.PlotArea.Select
```

```

        With
ActiveChart.TextBoxes.Add(362,    219,
387, 235)
            .Select
            .AutoSize = True
            .Text = "C7+"
        End With
        Selection.Font.Bold = True
        With Selection.Font
            .Name = "Arial Greek"
            .FontStyle = "Bold"
            .Size = 12
            .Strikethrough = False
            .Superscript = False
            .Subscript = False
            .OutlineFont = False
            .Shadow = False
            .Underline = xlNone
            .ColorIndex = xlAutomatic
            .Background          =
xlTransparent
        End With

ActiveChart.DrawingObjects("Text
3").Select
    Selection.Left = 42.9
    Selection.Top = 406.1
    ActiveChart.PlotArea.Select
    Sheets("RESULTS").Select
End Sub

```

KVAL1 MACRO

Η μακροεντολή **KVAL1** δημιουργεί διαγράμματα συντελεστών ισορροπίας των συστατικών με στοιχεία που εισάγει από τα αρχεία αποτελεσμάτων του προγράμματος **MMP**.

```

Sub KVAL1()
    Workbooks.OpenText
Filename:="C:\uniprogs\sot\mmp\test1\KVALUES.", Origin:= _
    xlMSDOS, StartRow:=1, DataType:=xlDelimited, TextQualifier:= _
    xlNone, ConsecutiveDelimiter:=True, Tab:=True, Semicolon:= _
    False, Comma:=False, Space:=True, Other:=False, FieldInfo:= _
    Array(Array(1, 1), Array(2, 1), Array(3, 1), Array(4, 1), Array(5, 1),
Array(6 _
    , 1), Array(7, 1), Array(8, 1), Array(9, 1), Array(10, 1), Array(11, 1),
Array( _
    12, 1), Array(13, 1), Array(14, 1), Array(15, 1))
    ChDir "C:\uniprogs\sot\mmp\test1"
    With ActiveWindow

        End With
        ActiveWindow.WindowState = xlMaximized
        With Toolbars(8)
            .Position = xlFloating
            .Left = 731
            .Top = 350
        End With
        ChDir "C:\uniprogs\sot\mmp\test1"

        Charts.Add
        ActiveChart.ChartWizard
        Source:=Sheets("KVALUES").Range("B3:B100"), _

```

```

Gallery:=xlXYScatter, Format:=2, PlotBy:=xlColumns, _
CategoryLabels:=0, SeriesLabels:=0, HasLegend:=1, Title:="", _
CategoryTitle:="", ValueTitle:="", ExtraTitle:=""
Sheets("Γράφημα1").Select
Sheets("Γράφημα1").Name = "KVAL1"
ActiveChart.Legend.Select
ActiveChart.Axes(xlValue).Select
With ActiveChart.Axes(xlValue)
    .MinimumScale = 0
    .MaximumScale = 2
    .MinorUnitIsAuto = True
    .MajorUnit = 0.2
    .Crosses = xlCustom
    .CrossesAt = 0
    .ReversePlotOrder = False
    .ScaleType = False
End With
With Selection.TickLabels.Font
    .Name = "Arial Greek"
    .FontStyle = "Bold"
    .Size = 12
    .Strikethrough = False
    .Superscript = False
    .Subscript = False
    .OutlineFont = False
    .Shadow = False
    .Underline = xlNone
    .ColorIndex = xlAutomatic
    .Background = xlAutomatic
End With
ActiveChart.PlotArea.Select
With Selection.Border
    .ColorIndex = 16
    .Weight = xlThin

```

```

        .LineStyle = xlContinuous
End With
With Selection.Interior
    .ColorIndex = 2
    .PatternColorIndex = 1
    .Pattern = xlSolid
End With
With ActiveChart.Axes(xlCategory)
    .HasMajorGridlines = True
    .HasMinorGridlines = False
End With
With ActiveChart.Axes(xlValue)
    .HasMajorGridlines = True
    .HasMinorGridlines = False
End With
ActiveChart.Legend.Select

With ActiveChart.SeriesCollection(1)
    .Name = ""KVAL1""
    .Values = "KVALUES!R3C2:R100C2"
End With
ActiveChart.Legend.Select
With Selection.Font
    .Name = "Arial Greek"
    .FontStyle = "Bold"
    .Size = 12
    .Strikethrough = False
    .Superscript = False
    .Subscript = False
    .OutlineFont = False
    .Shadow = False
    .Underline = xlNone
    .ColorIndex = xlAutomatic
    .Background = xlAutomatic

```

End With

ActiveChart.Axes(xlCategory).Select

With ActiveChart.Axes(xlCategory)

.MinimumScaleIsAuto = True

.MaximumScale = 100

.MinorUnitIsAuto = True

.MajorUnit = 1

.Crosses = xlAutomatic

.ReversePlotOrder = False

.ScaleType = False

End With

ActiveChart.Axes(xlValue).Select

With ActiveChart.Axes(xlValue)

.MinimumScale = 0

.MaximumScale = 2

.MinorUnitIsAuto = True

.MajorUnit = 0.1

.Crosses = xlCustom

.CrossesAt = 0

.ReversePlotOrder = False

.ScaleType = False

End With

ActiveChart.Axes(xlCategory).Select

With Selection.TickLabels.Font

.Name = "Arial Greek"

.FontStyle = "Bold"

.Size = 12

.Strikethrough = False

.Superscript = False

.Subscript = False

.OutlineFont = False

.Shadow = False

.Underline = xlNone

.ColorIndex = xlAutomatic

```

        .Background = xlAutomatic
    End With
    ActiveChart.Axes(xlValue).MajorGridlines.Select
    With Selection.Border
        .ColorIndex = 1
        .Weight = xlMedium
        .LineStyle = xlDot
    End With
    With Selection.Border
        .ColorIndex = 1
        .Weight = xlHairline
        .LineStyle = xlContinuous
    End With
    ActiveChart.Axes(xlValue).MajorGridlines.Select
    With Selection.Border
        .ColorIndex = 15
        .Weight = xlHairline
        .LineStyle = xlContinuous
    End With
    ActiveChart.Axes(xlCategory).MajorGridlines.Select
    With Selection.Border
        .ColorIndex = 16
        .Weight = xlHairline
        .LineStyle = xlContinuous
    End With
    ActiveChart.Axes(xlValue).MajorGridlines.Select
    With Selection.Border
        .ColorIndex = 16
        .Weight = xlHairline
        .LineStyle = xlContinuous
    End With
    Sheets("KVALUES").Select
    Charts.Add

```

ActiveChart.ChartWizard

```
Source:=Sheets("KVALUES").Range("C3:C100"), _
    Gallery:=xlXYScatter, Format:=2, PlotBy:=xlColumns, _
    CategoryLabels:=0, SeriesLabels:=0, HasLegend:=1, Title:="", _
    CategoryTitle:="", ValueTitle:="", ExtraTitle:=""
Sheets("Γράφημα2").Select
Sheets("Γράφημα2").Name = "KVAL2"
ActiveChart.PlotArea.Select
With Selection.Border
    .ColorIndex = 16
    .Weight = xlThin
    .LineStyle = xlContinuous
End With
With Selection.Interior
    .ColorIndex = 2
    .PatternColorIndex = 1
    .Pattern = xlSolid
End With
With ActiveChart.Axes(xlCategory)
    .HasMajorGridlines = True
    .HasMinorGridlines = False
End With
With ActiveChart.Axes(xlValue)
    .HasMajorGridlines = True
    .HasMinorGridlines = False
End With
ActiveChart.Legend.Select
ActiveChart.SeriesCollection(1).Select
With ActiveChart.SeriesCollection(1)
    .Name = ""KVAL2""
    .Values = "=KVALUES!R3C3:R100C3"
End With
ActiveChart.Axes(xlValue).Select
With ActiveChart.Axes(xlValue)
```

```
.MinimumScale = 0
.MaximumScale = 4
.MinorUnitIsAuto = True
.MajorUnit = 0.5
.Crosses = xlCustom
.CrossesAt = 0
.ReversePlotOrder = False
.ScaleType = False
End With
With Selection.TickLabels.Font
    .Name = "Arial Greek"
    .FontStyle = "Bold"
    .Size = 12
    .Strikethrough = False
    .Superscript = False
    .Subscript = False
    .OutlineFont = False
    .Shadow = False
    .Underline = xlNone
    .ColorIndex = xlAutomatic
    .Background = xlAutomatic
End With
Selection.TickLabels.NumberFormat = "0.0"
ActiveChart.ChartArea.Select
With Selection.Font
    .Name = "Arial Greek"
    .FontStyle = "Regular"
    .Size = 12
    .Strikethrough = False
    .Superscript = False
    .Subscript = False
    .OutlineFont = False
    .Shadow = False
    .Underline = xlNone
```

```

        .ColorIndex = xlAutomatic
        .Background = xlAutomatic
    End With
    Selection.Font.Bold = True
    ActiveChart.Axes(xlCategory).Select
    With ActiveChart.Axes(xlCategory)
        .MinimumScaleIsAuto = True
        .MaximumScale = 100
        .MinorUnitIsAuto = True
        .MajorUnit = 1
        .Crosses = xlAutomatic
        .ReversePlotOrder = False
        .ScaleType = False
    End With
    ActiveChart.Axes(xlValue).Select
    With ActiveChart.Axes(xlValue)
        .MinimumScale = 0
        .MaximumScale = 4
        .MinorUnitIsAuto = True
        .MajorUnit = 0.2
        .Crosses = xlCustom
        .CrossesAt = 0
        .ReversePlotOrder = False
        .ScaleType = False
    End With
    Sheets("KVAL1").Select
    ActiveChart.Axes(xlValue).Select
    With ActiveChart.Axes(xlValue)
        .MinimumScale = 0
        .MaximumScale = 4
        .MinorUnitIsAuto = True
        .MajorUnit = 0.2
        .Crosses = xlCustom
        .CrossesAt = 0
    End With

```

```

.ReversePlotOrder = False
.ScaleType = False
End With
ActiveChart.Deselect
ActiveChart.Axes(xlValue).Select
Selection.TickLabels.NumberFormat = "0.0"
ActiveChart.ChartArea.Select
With Selection.Font
    .Name = "Arial Greek"
    .FontStyle = "Regular"
    .Size = 12
    .Strikethrough = False
    .Superscript = False
    .Subscript = False
    .OutlineFont = False
    .Shadow = False
    .Underline = xlNone
    .ColorIndex = xlAutomatic
    .Background = xlAutomatic
End With
Selection.Font.Bold = True
Sheets("KVAL2").Select
ActiveChart.Axes(xlValue).MajorGridlines.Select
With Selection.Border
    .ColorIndex = 16
    .Weight = xlHairline
    .LineStyle = xlContinuous
End With
ActiveChart.Axes(xlCategory).MajorGridlines.Select
With Selection.Border
    .ColorIndex = 16
    .Weight = xlHairline
    .LineStyle = xlContinuous
End With

```

```

ActiveChart.PlotArea.Select
Sheets("KVALUES").Select
Charts.Add
ActiveChart.ChartWizard
Source:=Sheets("KVALUES").Range("D3:D100"), _
    Gallery:=xlXYScatter, Format:=2, PlotBy:=xlColumns, _
    CategoryLabels:=0, SeriesLabels:=0, HasLegend:=1, Title:="", _
    CategoryTitle:="", ValueTitle:="", ExtraTitle:=""
ActiveChart.PlotArea.Select
With Selection.Border
    .ColorIndex = 16
    .Weight = xlThin
    .LineStyle = xlContinuous
End With
With Selection.Interior
    .ColorIndex = 2
    .PatternColorIndex = 1
    .Pattern = xlSolid
End With
Sheets("KVAL2").Select
ActiveChart.ChartArea.Select
ActiveChart.ChartArea.Copy
Sheets("Γράφημα3").Select
ActiveChart.Paste
ActiveChart.SeriesCollection(2).Select
Selection.Delete
ActiveChart.SeriesCollection(1).Select
With ActiveChart.SeriesCollection(1)
    .Name = "=""KVAL3""""
    .Values = "=""KVALUES!R3C4:R100C4""
End With
Sheets("Γράφημα3").Select
Sheets("Γράφημα3").Name = "KVAL3"
Sheets("KVALUES").Select

```

```

Charts.Add
ActiveChart.ChartWizard
Source:=Sheets("KVALUES").Range("E3:E100"), _
    Gallery:=xlXYScatter, Format:=2, PlotBy:=xlColumns, _
    CategoryLabels:=0, SeriesLabels:=0, HasLegend:=1, Title:="", _
    CategoryTitle:="", ValueTitle:="", ExtraTitle:=""
Sheets("KVAL3").Select
ActiveChart.ChartArea.Select
ActiveChart.ChartArea.Copy
Sheets("Γράφημα4").Select
ActiveChart.Paste
ActiveChart.Axes(xlValue).MajorGridlines.Select
ActiveChart.SeriesCollection(2).Select
Selection.Delete
ActiveChart.SeriesCollection(1).Select
With ActiveChart.SeriesCollection(1)
    .Name = ""KVAL4""
    .Values = "KVALUES!R3C5:R100C5"
End With
Sheets("Γράφημα4").Select
Sheets("Γράφημα4").Name = "KVAL4"
Sheets("KVALUES").Select
Charts.Add
ActiveChart.ChartWizard    Source:=Sheets("Φύλλο1").Range("A1"),
Gallery _
    :=xlColumn, Format:=6, PlotBy:=xlRows, CategoryLabels:=1, _
    SeriesLabels:=1, HasLegend:=1
Charts.Add
ActiveChart.ChartWizard    Source:=Sheets("Φύλλο1").Range("A1"),
Gallery _
    :=xlXYScatter, Format:=3, PlotBy:=xlRows, CategoryLabels:=1, _
    SeriesLabels:=1, HasLegend:=1
Charts.Add

```

```

ActiveChart.ChartWizard      Source:=Sheets("Φύλλο1").Range("A1"),
Gallery _
:=xlColumn, Format:=6, PlotBy:=xlRows, CategoryLabels:=1, _
SeriesLabels:=1, HasLegend:=1
Charts.Add
ActiveChart.ChartWizard      Source:=Sheets("Φύλλο1").Range("A1"),
Gallery _
:=xlColumn, Format:=6, PlotBy:=xlRows, CategoryLabels:=1, _
SeriesLabels:=1, HasLegend:=1
Sheets("KVAL4").Select
ActiveChart.Axes(xlValue).MajorGridlines.Select
ActiveChart.ChartArea.Select
ActiveChart.ChartArea.Copy
Sheets("Γράφημα5").Select
ActiveChart.Paste
ActiveChart.SeriesCollection(1).Select
With ActiveChart.SeriesCollection(1)
.Name = ""KVAL5""
.Values = "KVALUES!R3C6:R100C6"
End With
Sheets("Γράφημα5").Select
Sheets("Γράφημα5").Name = "KVAL5"
ActiveChart.ChartArea.Select
ActiveChart.ChartArea.Copy
Sheets("Γράφημα6").Select
ActiveChart.Paste
Sheets("Γράφημα6").Select
Sheets("Γράφημα6").Name = "KVAL6"
ActiveChart.SeriesCollection(1).Select
ActiveChart.SeriesCollection(1).Points(6).Select
ActiveChart.Axes(xlCategory).MajorGridlines.Select
ActiveChart.SeriesCollection(1).Select
With ActiveChart.SeriesCollection(1)
.Name = ""KVAL6""

```

```

        .Values = "=KVALUES!R3C7:R100C7"
End With
ActiveChart.ChartArea.Select
ActiveChart.ChartArea.Copy
Sheets("Γράφημα7").Select
ActiveChart.Paste
Sheets("Γράφημα7").Select
Sheets("Γράφημα7").Name = "KVAL7"
ActiveChart.SeriesCollection(1).Select
With ActiveChart.SeriesCollection(1)
    .Name = "=""KVAL7""""
    .Values = "=KVALUES!R3C8:R100C8"
End With
ActiveChart.ChartArea.Select
ActiveChart.ChartArea.Copy
Sheets("Γράφημα8").Select
ActiveChart.Paste
ActiveChart.SeriesCollection(1).Select
With ActiveChart.SeriesCollection(1)
    .Name = "=""KVAL8""""
    .Values = "=KVALUES!R3C9:R100C9"
End With
Sheets("Γράφημα8").Select
Sheets("Γράφημα8").Name = "KVAL8"
Charts.Add
ActiveChart.ChartWizard    Source:=Sheets("Φύλλο1").Range("A1"),
Gallery _
    :=xlColumn, Format:=6, PlotBy:=xlRows, CategoryLabels:=1, _
    SeriesLabels:=1, HasLegend:=1
Charts.Add
ActiveChart.ChartWizard    Source:=Sheets("Φύλλο1").Range("A1"),
Gallery _
    :=xlColumn, Format:=6, PlotBy:=xlRows, CategoryLabels:=1, _
    SeriesLabels:=1, HasLegend:=1

```

```

Charts.Add
ActiveChart.ChartWizard    Source:=Sheets("Φύλλο1").Range("A1"),
Gallery _
:=xlColumn, Format:=6, PlotBy:=xlRows, CategoryLabels:=1, _
SeriesLabels:=1, HasLegend:=1
Charts.Add
ActiveChart.ChartWizard    Source:=Sheets("Φύλλο1").Range("A1"),
Gallery _
:=xlColumn, Format:=6, PlotBy:=xlRows, CategoryLabels:=1, _
SeriesLabels:=1, HasLegend:=1
Charts.Add
ActiveChart.ChartWizard    Source:=Sheets("Φύλλο1").Range("A1"),
Gallery _
:=xlColumn, Format:=6, PlotBy:=xlRows, CategoryLabels:=1, _
SeriesLabels:=1, HasLegend:=1
Charts.Add
ActiveChart.ChartWizard    Source:=Sheets("Φύλλο1").Range("A1"),
Gallery _
:=xlColumn, Format:=6, PlotBy:=xlRows, CategoryLabels:=1, _
SeriesLabels:=1, HasLegend:=1
Charts.Add
ActiveChart.ChartWizard    Source:=Sheets("Φύλλο1").Range("A1"),
Gallery _
:=xlColumn, Format:=6, PlotBy:=xlRows, CategoryLabels:=1, _
SeriesLabels:=1, HasLegend:=1
Charts.Add
ActiveChart.ChartWizard    Source:=Sheets("Φύλλο1").Range("A1"),
Gallery _
:=xlColumn, Format:=6, PlotBy:=xlRows, CategoryLabels:=1, _
SeriesLabels:=1, HasLegend:=1
ActiveWindow.ScrollWorkbookTabs Sheets:=1
ActiveWindow.ScrollWorkbookTabs Sheets:=1
Sheets("Γράφημα9").Select
Sheets("Γράφημα9").Name = "KVAL9"

```

```

Sheets("Γράφημα10").Select
Sheets("Γράφημα10").Name = "KVAL10"
Sheets("Γράφημα11").Select
Sheets("Γράφημα11").Name = "KVAL11"
Sheets("Γράφημα12").Select
Sheets("Γράφημα12").Name = "KVAL12"
Sheets("Γράφημα13").Select
Sheets("Γράφημα13").Name = "KVAL13"
ActiveWindow.ScrollWorkbookTabs Sheets:=-1
ActiveWindow.ScrollWorkbookTabs Sheets:=-1
ActiveWindow.ScrollWorkbookTabs Sheets:=-1
ActiveWindow.ScrollWorkbookTabs Sheets:=-1
Sheets("Γράφημα14").Select
Sheets("Γράφημα14").Name = "KVAL14"
Sheets("Γράφημα15").Select
Sheets("Γράφημα15").Name = "KVAL15"
Sheets("Γράφημα16").Select
Sheets("Γράφημα16").Name = "KVALALL"
ActiveWindow.ScrollWorkbookTabs Sheets:=1
ActiveWindow.ScrollWorkbookTabs Sheets:=1
ActiveWindow.ScrollWorkbookTabs Sheets:=1
ActiveWindow.ScrollWorkbookTabs Sheets:=1
ActiveWindow.ScrollWorkbookTabs Sheets:=1
ActiveWindow.ScrollWorkbookTabs Sheets:=1
ActiveWindow.ScrollWorkbookTabs Sheets:=1
Sheets("KVAL8").Select
ActiveChart.ChartArea.Select
ActiveChart.ChartArea.Copy
Sheets("KVAL9").Select
ActiveChart.Paste
Sheets("KVAL10").Select
ActiveChart.Paste
Sheets("KVAL11").Select
ActiveChart.Paste
ActiveWindow.ScrollWorkbookTabs Sheets:=-1

```

```

ActiveWindow.ScrollWorkbookTabs Sheets:=-1
ActiveWindow.ScrollWorkbookTabs Sheets:=-1
ActiveWindow.ScrollWorkbookTabs Sheets:=-1
ActiveWindow.ScrollWorkbookTabs Sheets:=-1
Sheets("KVAL12").Select
ActiveChart.Paste
Sheets("KVAL13").Select
ActiveChart.Paste
Sheets("KVAL14").Select
ActiveChart.Paste
Sheets("KVAL15").Select
ActiveChart.Paste
ActiveWindow.ScrollWorkbookTabs Sheets:=1
ActiveWindow.ScrollWorkbookTabs Sheets:=1
ActiveWindow.ScrollWorkbookTabs Sheets:=1
ActiveWindow.ScrollWorkbookTabs Sheets:=1
Sheets("KVAL9").Select
ActiveChart.SeriesCollection(1).Select
With ActiveChart.SeriesCollection(1)
    .Name = "=""KVAL9""""
    .Values = "=""KVALUES!R3C10:R100C10""
End With
ActiveWindow.ScrollWorkbookTabs Sheets:=-1
ActiveWindow.ScrollWorkbookTabs Position:=xlFirst
ActiveWindow.ScrollWorkbookTabs Position:=xlFirst
ActiveWindow.ScrollWorkbookTabs Sheets:=1
ActiveWindow.ScrollWorkbookTabs Sheets:=1
ActiveWindow.ScrollWorkbookTabs Sheets:=1
ActiveWindow.ScrollWorkbookTabs Sheets:=1
ActiveWindow.ScrollWorkbookTabs Sheets:=1
Sheets("KVAL10").Select
ActiveChart.SeriesCollection(1).Select
With ActiveChart.SeriesCollection(1)
    .Name = "=""KVAL10""""

```

```

.Values = "=KVALUES!R3C11:R100C11"
End With
ActiveWindow.ScrollWorkbookTabs Sheets:=-1
Sheets("KVAL11").Select
ActiveChart.PlotArea.Select
ActiveChart.SeriesCollection(1).Select
With ActiveChart.SeriesCollection(1)
    .Name = "=""KVAL11""
    .Values = "=KVALUES!R3C12:R100C12"
End With
ActiveWindow.ScrollWorkbookTabs Sheets:=-1
Sheets("KVAL12").Select
ActiveChart.SeriesCollection(1).Select
With ActiveChart.SeriesCollection(1)
    .Name = "=""KVAL12""
    .Values = "=KVALUES!R3C13:R100C13"
End With
ActiveWindow.ScrollWorkbookTabs Sheets:=-1
Sheets("KVAL13").Select
ActiveChart.SeriesCollection(1).Select
With ActiveChart.SeriesCollection(1)
    .Name = "=""KVAL13""
    .Values = "=KVALUES!R3C14:R100C14"
End With
ActiveWindow.ScrollWorkbookTabs Sheets:=-1
Sheets("KVAL14").Select
ActiveChart.SeriesCollection(1).Select
With ActiveChart.SeriesCollection(1)
    .Name = "=""KVAL14""
    .Values = "=KVALUES!R3C15:R100C15"
End With
ActiveWindow.ScrollWorkbookTabs Sheets:=-1
Sheets("KVAL15").Select
ActiveChart.PlotArea.Select

```

```

ActiveChart.SeriesCollection(1).Select
With ActiveChart.SeriesCollection(1)
    .Name = ""KVAL15""
    .Values = "=KVALUES!R3C16:R100C16"
End With
ActiveWindow.ScrollWorkbookTabs Sheets:=-1
Sheets("KVALALL").Select
ActiveWindow.ScrollWorkbookTabs Sheets:=-1
ActiveWindow.ScrollWorkbookTabs Sheets:=-1
ActiveWindow.ScrollWorkbookTabs Sheets:=-1
ActiveWindow.ScrollWorkbookTabs Sheets:=-1
Sheets("KVAL1").Select
ActiveChart.ChartArea.Copy
Sheets("KVALALL").Select
ActiveChart.Paste
Sheets("KVAL2").Select
ActiveChart.ChartArea.Copy
Sheets("KVALALL").Select
ActiveChart.Paste
Sheets("KVAL3").Select
ActiveChart.ChartArea.Copy
Sheets("KVALALL").Select
ActiveChart.Paste
Sheets("KVAL4").Select
ActiveChart.ChartArea.Copy
Sheets("KVALALL").Select
ActiveChart.Paste
ActiveWindow.ScrollWorkbookTabs Sheets:=5
ActiveWindow.ScrollWorkbookTabs Sheets:=6
Sheets("KVAL5").Select
ActiveChart.ChartArea.Copy
ActiveWindow.ScrollWorkbookTabs Sheets:=-1
ActiveWindow.ScrollWorkbookTabs Sheets:=-1
ActiveWindow.ScrollWorkbookTabs Sheets:=-1

```

ActiveWindow.ScrollWorkbookTabs Sheets:=-1
ActiveWindow.ScrollWorkbookTabs Sheets:=-1
ActiveWindow.ScrollWorkbookTabs Sheets:=-1
ActiveWindow.ScrollWorkbookTabs Sheets:=-1
ActiveWindow.ScrollWorkbookTabs Sheets:=-1
Sheets("KVALALL").Select
ActiveChart.Paste
ActiveWindow.ScrollWorkbookTabs Sheets:=3
ActiveWindow.ScrollWorkbookTabs Sheets:=1
ActiveWindow.ScrollWorkbookTabs Sheets:=1
Sheets("KVAL6").Select
ActiveChart.ChartArea.Copy
ActiveWindow.ScrollWorkbookTabs Sheets:=-1
ActiveWindow.ScrollWorkbookTabs Sheets:=-1
ActiveWindow.ScrollWorkbookTabs Sheets:=-1
ActiveWindow.ScrollWorkbookTabs Sheets:=-1
Sheets("KVALALL").Select
ActiveChart.Paste
ActiveWindow.ScrollWorkbookTabs Sheets:=1
ActiveWindow.ScrollWorkbookTabs Sheets:=1
ActiveWindow.ScrollWorkbookTabs Sheets:=1
Sheets("KVAL7").Select
ActiveChart.ChartArea.Copy
ActiveWindow.ScrollWorkbookTabs Sheets:=-1
ActiveWindow.ScrollWorkbookTabs Sheets:=-1
ActiveWindow.ScrollWorkbookTabs Sheets:=-1
ActiveWindow.ScrollWorkbookTabs Sheets:=-1
Sheets("KVALALL").Select
ActiveChart.Paste
ActiveWindow.ScrollWorkbookTabs Sheets:=1
ActiveWindow.ScrollWorkbookTabs Sheets:=1
ActiveWindow.ScrollWorkbookTabs Sheets:=1
Sheets("KVAL8").Select
ActiveChart.ChartArea.Copy

ActiveWindow.ScrollWorkbookTabs Sheets:=-1
ActiveWindow.ScrollWorkbookTabs Sheets:=-1
ActiveWindow.ScrollWorkbookTabs Sheets:=-1
Sheets("KVALALL").Select
ActiveChart.Paste
ActiveWindow.ScrollWorkbookTabs Sheets:=1
ActiveWindow.ScrollWorkbookTabs Sheets:=1
ActiveWindow.ScrollWorkbookTabs Sheets:=1
Sheets("KVAL9").Select
ActiveChart.ChartArea.Select
ActiveChart.ChartArea.Copy
ActiveWindow.ScrollWorkbookTabs Sheets:=-1
ActiveWindow.ScrollWorkbookTabs Sheets:=-1
Sheets("KVALALL").Select
ActiveChart.Paste
Sheets("KVAL10").Select
ActiveChart.ChartArea.Select
ActiveChart.ChartArea.Copy
ActiveWindow.ScrollWorkbookTabs Sheets:=-1
Sheets("KVALALL").Select
ActiveChart.Paste
Sheets("KVAL11").Select
ActiveChart.ChartTitle.Select
ActiveChart.ChartArea.Select
ActiveChart.ChartArea.Copy
Sheets("KVALALL").Select
ActiveChart.Paste
Sheets("KVAL12").Select
ActiveChart.ChartTitle.Select
ActiveChart.ChartArea.Select
ActiveChart.ChartArea.Copy
Sheets("KVALALL").Select
ActiveChart.Paste
Sheets("KVAL13").Select

```

ActiveChart.ChartArea.Select
ActiveChart.ChartArea.Copy
Sheets("KVALALL").Select
ActiveChart.Paste
Sheets("KVAL14").Select
ActiveChart.ChartArea.Select
ActiveChart.ChartArea.Copy
Sheets("KVALALL").Select
ActiveChart.Paste
Sheets("KVAL15").Select
ActiveChart.ChartArea.Select
ActiveChart.ChartArea.Copy
Sheets("KVALALL").Select
ActiveChart.Paste
ActiveChart.SeriesCollection(10).Select
With Selection.Border
    .Weight = xlThin
    .LineStyle = xlAutomatic
End With
With Selection
    .MarkerBackgroundColorIndex = 3
    .MarkerForegroundColorIndex = 3
    .MarkerStyle = xlDiamond
    .Smooth = False
End With
With Selection.Border
    .ColorIndex = 3
    .Weight = xlThin
    .LineStyle = xlContinuous
End With
With Selection
    .MarkerBackgroundColorIndex = 3
    .MarkerForegroundColorIndex = 3
    .MarkerStyle = xlDiamond

```

```

        .Smooth = False
    End With
    ActiveChart.Axes(xlValue).MajorGridlines.Select
    ActiveChart.SeriesCollection(9).Select
    With Selection.Border
        .ColorIndex = 10
        .Weight = xlThin
        .LineStyle = xlContinuous
    End With
    With Selection
        .MarkerBackgroundColorIndex = 10
        .MarkerForegroundColorIndex = 10
        .MarkerStyle = xlDiamond
        .Smooth = False
    End With
    ActiveChart.Axes(xlCategory).MajorGridlines.Select
    ActiveChart.SeriesCollection(11).Select
    With Selection.Border
        .ColorIndex = 1
        .Weight = xlThin
        .LineStyle = xlContinuous
    End With
    With Selection
        .MarkerBackgroundColorIndex = 35
        .MarkerForegroundColorIndex = 35
        .MarkerStyle = xlAutomatic
        .Smooth = False
    End With
    ActiveChart.Axes(xlCategory).MajorGridlines.Select
    ActiveChart.SeriesCollection(11).Select
    With Selection.Border
        .ColorIndex = 1
        .Weight = xlThin
        .LineStyle = xlContinuous

```

End With

With Selection

.MarkerBackgroundColorIndex = 35

.MarkerForegroundColorIndex = 1

.MarkerStyle = xlSquare

.Smooth = False

End With

ActiveChart.Axes(xlValue).MajorGridlines.Select

ActiveChart.Axes(xlCategory).Select

ActiveChart.Legend.Select

ActiveChart.PlotArea.Select

ActiveChart.ChartArea.Select

ActiveChart.SeriesCollection(15).Select

ActiveChart.SeriesCollection(14).Select

ActiveChart.SeriesCollection(15).Select

With Selection.Border

.ColorIndex = 4

.Weight = xlThin

.LineStyle = xlContinuous

End With

With Selection

.MarkerBackgroundColorIndex = 4

.MarkerForegroundColorIndex = 4

.MarkerStyle = xlCircle

.Smooth = False

End With

ActiveChart.ChartArea.Select

ActiveChart.PlotArea.Select

ActiveChart.ChartArea.Select

ActiveChart.SeriesCollection(15).Select

ActiveChart.SeriesCollection(14).Select

With Selection.Border

.ColorIndex = 7

.Weight = xlThin

```
.LineStyle = xlContinuous
End With
With Selection
    .MarkerBackgroundColorIndex = 7
    .MarkerForegroundColorIndex = 7
    .MarkerStyle = xlTriangle
    .Smooth = False
End With
ActiveChart.SeriesCollection(13).Select
With Selection.Border
    .ColorIndex = 1
    .Weight = xlThin
    .LineStyle = xlContinuous
End With
With Selection
    .MarkerBackgroundColorIndex = 1
    .MarkerForegroundColorIndex = 1
    .MarkerStyle = xlCircle
    .Smooth = False
End With
ActiveChart.SeriesCollection(12).Select
With Selection.Border
    .ColorIndex = 32
    .Weight = xlThin
    .LineStyle = xlContinuous
End With
With Selection
    .MarkerBackgroundColorIndex = 32
    .MarkerForegroundColorIndex = 5
    .MarkerStyle = xlTriangle
    .Smooth = False
End With
ActiveChart.SeriesCollection(11).Select
ActiveChart.SeriesCollection(12).Select
```

```
ActiveChart.SeriesCollection(11).Select
ActiveChart.SeriesCollection(10).Select
ActiveChart.SeriesCollection(11).Select
ActiveChart.SeriesCollection(10).Select
ActiveChart.SeriesCollection(9).Select
ActiveChart.SeriesCollection(10).Select
ActiveChart.SeriesCollection(9).Select
ActiveChart.SeriesCollection(8).Select
With Selection.Border
    .Weight = xlThin
    .LineStyle = xlAutomatic
End With
With Selection
    .MarkerBackgroundColorIndex = xlNone
    .MarkerForegroundColorIndex = 32
    .MarkerStyle = xlSquare
    .Smooth = False
End With
ActiveChart.SeriesCollection(7).Select
With Selection.Border
    .ColorIndex = 3
    .Weight = xlThin
    .LineStyle = xlContinuous
End With
With Selection
    .MarkerBackgroundColorIndex = 2
    .MarkerForegroundColorIndex = 3
    .MarkerStyle = xlCircle
    .Smooth = False
End With
ActiveChart.SeriesCollection(6).Select
With Selection.Border
    .Weight = xlThin
    .LineStyle = xlAutomatic
```

End With

With Selection

.MarkerBackgroundColorIndex = 30

.MarkerForegroundColorIndex = 30

.MarkerStyle = xlX

.Smooth = False

End With

ActiveChart.SeriesCollection(5).Select

With Selection.Border

.Weight = xlThin

.LineStyle = xlAutomatic

End With

With Selection

.MarkerBackgroundColorIndex = xlNone

.MarkerForegroundColorIndex = 29

.MarkerStyle = xlCircle

.Smooth = False

End With

ActiveChart.Axes(xlValue).MajorGridlines.Select

ActiveWindow.ScrollWorkbookTabs Position:=xlLast

ActiveWindow.ScrollWorkbookTabs Position:=xlLast

ActiveWindow.ScrollWorkbookTabs Position:=xlLast

Sheets("KVALUES").Select

With ActiveWorkbook

.Title = ""

.Subject = ""

.Author = "ZEPBAS ΣΩΤΗΡΗΣ"

.Keywords = ""

.Comments = ""

End With

Sheets("KVAL5").Select

ActiveWindow.ScrollWorkbookTabs Sheets:=-5

ActiveWindow.ScrollWorkbookTabs Sheets:=-1

ActiveWindow.ScrollWorkbookTabs Sheets:=-1

[illegible]
