



دانشکده مهندسی شیمی، نفت و گاز

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی شیمی - گرایش جداسازی

عنوان:

محاسبه حداقل فشار امتزاجی با روش کشش بین سطحی صفر

توسط:

مهدي محامي

استاد راهنما:

محمد نادر لطف اللهی

دی 1389

## تقدیم به:

روان پاک پدرم و تقدیم به مادر عزیزم  
که همواره با دعای خیر، این مقیر را یاری کردند.

و با تشکر از:

استاد عزیز، جناب آقای دکتر لطف الهی که در طول انجام این پایان نامه،  
همواره با راهنمایی های خود، انجام این پروژه را تسهیل نمودند.

## فهرست مطالب

فهرست جداول .....	خ
فهرست اشکال .....	د
چکیده .....	س
فصل اول: مقدمه، هدف از انجام تحقیق .....	1
1-1- مقدمه .....	2
2-1- هدف از انجام تحقیق .....	3
فصل دوم: کشش بین سطحی، روش‌های آزمایشگاهی و نظری برای اندازه‌گیری آن .....	5
1-2- کشش بین سطحی چیست؟ .....	6
2-2- تاریخچه ارائه روابط برای محاسبه کشش بین سطحی .....	6
3-2- روش‌های آزمایشگاهی برای اندازه‌گیری کشش بین سطحی .....	9
1-3-2- روش موئینگی .....	9
2-3-2- روش قطره آویزان .....	11
4-2- روش‌های نظری برای محاسبه کشش بین سطحی .....	12
1-4-2- روش پاراکر .....	12
2-4-2- نظریه گرادیان .....	14
3-4-2- محاسبات تعادلی بخار- مایع .....	17
فصل سوم: امتزاج پذیری، حداقل فشار امتزاجی و روش‌های اندازه‌گیری آن .....	22
1-3- آشنایی با دیاگرام مثلثی .....	23
2-3- امتزاج پذیری .....	24

- 25.....1-2-3- فرآیند امتزاجی تماس اول یا تماس تورمی (FCM)
- 26.....2-2-3- فرآیند امتزاجی تماس چند گانه (MCM)
- 26.....1-2-2-3- مکانیسم رانش تبخیری گاز یا تماس چند گانه رو به جلو (VGD)
- 28.....2-2-2-3- مکانیسم رانش میعانی گاز یا تماس چند گانه رو به عقب (CGD)
- 29.....3-2-2-3- مکانیسم رانش میعانی - تبخیری گاز (CVGD)
- 31.....3-3- حداقل فشار امتزاجی چیست؟
- 32.....4-3- روش های آزمایشگاهی برای تعیین حداقل فشار امتزاجی
- 32.....1-4-3- آزمایش لوله قلمی
- 33.....2-4-3- آزمایش حباب صعود کننده
- 35.....3-4-3- آزمایش های دما/حجم/فشار
- 36.....4-4-3- روش به صفر رساندن کشش بین سطحی
- 37.....5-3- روش های نظری برای محاسبه حداقل فشار امتزاجی
- 40.....فصل چهارم: مروری بر نتایج کارهای انجام شده
- 41.....1-4- کارهای انجام شده برای محاسبه کشش بین سطحی
- 41.....1-1-4- مخلوط های چهار جزئی
- 42.....2-1-4- مخلوط های نفتی
- 45.....2-4- کارهای انجام شده برای محاسبه حداقل فشار امتزاجی
- 45.....1-2-4- روش رانو و لی
- 48.....2-2-4- روش اور و جسن
- 50.....1-2-2-4- سیستم های سه جزئی
- 52.....2-2-2-4- سیستم چهار جزئی

54	3-2-2-4- مخلوط 12 جزئی
55	3-2-4- روش احمدی و جان
58	فصل پنجم: محاسبات و نتایج
59	1-5- الگوریتم‌ها و معادلات
59	1-1-5- محاسبات فلش
63	2-1-5- محاسبه کشش بین سطحی
64	1-2-1-5- روش پاراکر
64	2-2-1-5- روش نظریه گرادیان
69	3-1-5- محاسبه حداقل فشار امتزاجی
73	2-5- نتایج
75	1-2-5- سیستم شماره 1
80	2-2-5- سیستم شماره 2
85	3-2-5- سیستم شماره 3
90	4-2-5- سیستم شماره 4
96	5-2-5- سیستم شماره 5
101	6-2-5- سیستم شماره 6
105	7-2-5- سیستم شماره 7
108	3-5- بحث و بررسی
110	4-5- پیشنهاداتی برای ادامه انجام پروژه
111	مراجع

## فهرست جداول

- جدول (1-2): مقدار پاراکر برای متداول ترین اجزای موجود در مخلوط‌های نفتی [1] ..... 13
- جدول (2-2): مقدار ضرایب موجود در معادله حالت برای متداول ترین اجزای موجود در نفت خام [54] ..... 19
- جدول (1-3): پارامترهای موجود در معادله (9-3) ..... 39
- جدول (1-4): ترکیب درصد پنج مخلوط نفتی [79] ..... 43
- جدول (2-4): مشخصات مخلوط‌های نفتی ذکر شده در جدول (1-4) [79] ..... 43
- جدول (3-4): مقایسه مقادیر *MMP* تعیین شده توسط روش رانو و مقادیر مشاهده شده برای *MMP* [70] ..... 47
- جدول (4-4): مقدار تخمین *MMP* از روش VIT برای نفتی شامل 25% C<sub>1</sub> و 75% C<sub>10</sub> که توسط گاز خالص CO<sub>2</sub> در دمای °C 71/1 جابجا می شود [62] ..... 51
- جدول (5-4): مقدار تخمین *MMP* از روش VIT برای مخلوطی شامل 25% C<sub>1</sub>، 50% C<sub>4</sub> و 25% C<sub>10</sub> که در تماس با گاز خالص C<sub>1</sub> در دمای °C 71/1 قرار می گیرد [62] ..... 52
- جدول (6-4): مقدار تخمین *MMP* از روش VIT برای مخلوطی شامل 25% C<sub>1</sub>، 50% C<sub>4</sub> و 25% C<sub>10</sub> در تماس با مخلوط گازی شامل 50% C<sub>1</sub> و 50% CO<sub>2</sub> در دمای °C 71/1 [62] ..... 53
- جدول (7-4): مقدار مقدار تخمین *MMP* از روش VIT برای مخلوط نفت A و گاز A از زیک در دمای °C 85 [62] ..... 54
- جدول (8-4): مقدار ترکیب درصد اجزا در اولین سیستم مورد مطالعه احمدی و جان ..... 56
- جدول (9-4): مقدار ترکیب درصد اجزا در دومین سیستم مورد مطالعه احمدی و جان ..... 56
- جدول (1-5): خواص فیزیکی اجزا [62] ..... 74
- جدول (2-5): ضرایب برهم کنش دوتایی [62] ..... 74
- جدول (3-5): مشخصات سیستم حاوی نفتی با C<sub>1</sub> 25% و C<sub>10</sub> 75% در تماس با CO<sub>2</sub> خالص ..... 75
- جدول (4-5): مشخصات سیستم حاوی نفتی با مشخصات C<sub>1</sub> 25%، C<sub>4</sub> 50% و C<sub>10</sub> 25% در تماس با C<sub>1</sub> خالص (سیستم شماره 2) ..... 80
- جدول (5-5): نتایج به دست آمده برای سیستم شماره 2 ..... 84
- جدول (6-5): مشخصات سیستم حاوی نفتی با مشخصات C<sub>1</sub> 25%، C<sub>4</sub> 50% و C<sub>10</sub> 25% در تماس با گازی با مشخصات CO<sub>2</sub> 50% و C<sub>1</sub> 50% (سیستم شماره 3) ..... 85



- جدول (7-5): نتایج به دست آمده برای سیستم شماره 3 ..... 89
- جدول (8-5): مشخصات سیستم نفت 9 جزئی در تماس با گاز 5 جزئی (سیستم شماره 4) ..... 91
- جدول (9-5): نتایج به دست آمده برای سیستم شماره 4 ..... 95
- جدول (10-5): مشخصات سیستم نفتی 11 جزئی در تماس با گاز 10 جزئی (سیستم شماره 5) ..... 96
- جدول (11-5): نتایج به دست آمده برای سیستم شماره 5 ..... 100
- جدول (12-5): مشخصات سیستم نفتی 17 جزئی در تماس با گاز 1 جزئی (سیستم شماره 6) [90] ..... 101

## فهرست اشکال

- شکل (1-2): ارتفاع موئینگی در یک لوله شیشه ای ..... 10
- شکل (2-2): شکل قطره آویزان ..... 11
- شکل (1-3): دیاگرام مثلثی [57] ..... 23
- شکل (2-3): بررسی امتزاج پذیری در دیاگرام مثلثی [57] ..... 25
- شکل (3-3): نمایی از آزمایش تماس چندگانه روبه جلو [57] ..... 27
- شکل (4-3): شماتیک رانش تبخیری در حین تزریق گاز به مخزن نفت [58] ..... 27
- شکل (5-3): بررسی مکانیسم رانش تبخیری در دیاگرام مثلثی [57] ..... 27
- شکل (6-3): نمایی از آزمایش تماس چندگانه روبه عقب [57] ..... 28
- شکل (7-3): بررسی امتزاج پذیری در مکانیسم رانش میعانی [57] ..... 29
- شکل (8-3): شماتیک رانش میعانی - تبخیری در حین تزریق گاز به مخزن نفت [58] ..... 30
- شکل (9-3): شماتیک هر سه نوع رانش در حین تزریق گاز به مخزن نفت [58] ..... 30
- شکل (10-3): نمایی از یک سیستم آزمایشگاهی لوله قلمی [57] ..... 33
- شکل (11-3): نمایی از سیستم آزمایشگاهی حباب صعود کننده [68] ..... 34
- شکل (12-3): نمایی از آزمایش تورم [69] ..... 35
- شکل (13-3): نمایی از سلول استفاده شده برای آزمایش تعیین کشش بین سطحی نفت و گاز تزریقی [70] ... 37

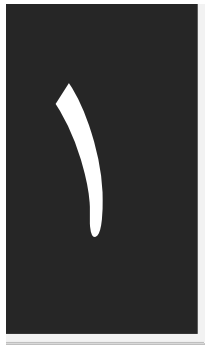
- شکل (1-4): نمودار کشش بین سطحی در برابر فشار در دمای 313.15 K برای مخلوط‌های CH<sub>4</sub>/CUT. (♦) داده‌های آزمایشگاهی [80]. (A) ترکیب 1، (B) ترکیب 2، (C) ترکیب 3، (D) ترکیب 4. (-- --) روش GT2 (-o-) [79] ..... 42
- شکل (2-4): نمودار کشش بین سطحی در برابر فشار برای سیال 1 در دمای 399.15 K. (♦) داده‌های آزمایشگاهی گزارش شده توسط شرکت Total، (-●-) نظریه گرادیان بر مبنای تعریف 1 (15 شبه جزء)، (--●-) نظریه گرادیان بر مبنای تعریف 2 (6 شبه جزء)، (-Δ-) روش پاراکر بر مبنای تعریف 1، (--Δ-) روش پاراکر بر مبنای تعریف 2 [79] ..... 44
- شکل (3-4): نمودار کشش بین سطحی در برابر فشار برای سیال‌های 2، 3، 4 و 5 در دمای 399.15 K. (♦) داده‌های آزمایشگاهی گزارش شده توسط شرکت Total، (-●-) نظریه گرادیان بر مبنای تعریف 1 (15 شبه جزء)، (--●-) نظریه گرادیان بر مبنای تعریف 2 (6 شبه جزء)، (-Δ-) روش پاراکر بر مبنای تعریف 1، (--Δ-) روش پاراکر بر مبنای تعریف 2 [79] ..... 45
- شکل (4-4): تصاویر ثبت شده برای نفت خام ترانوا در تماس با گازهای مختلف و در فشارهای مختلف [70] ... 46
- شکل (5-4): اثر فشار بر کشش بین سطحی نفت ترانوا در تماس با سه گاز مختلف در دمای 96 °C [70] ..... 47
- شکل (6-4): مقایسه مقدار محاسبه شده برای ترکیب درصد اجزا و مقدار گزارش شده توسط ریمر و ساگ [83] برای مخلوط CO<sub>2</sub>-C<sub>10</sub> [62] ..... 49
- شکل (7-4): مقایسه مقدار محاسبه شده برای دانسیته اجزا و مقادیر گزارش شده توسط ریمر و ساگ و آیرالا و رائو برای مخلوط CO<sub>2</sub>-C<sub>10</sub> در دمای 37/8 °C [62] ..... 49
- شکل (8-4): مقایسه مقدار محاسبه شده برای کشش بین سطحی و مقادیر گزارش شده توسط آیرالا و رائو برای مخلوط CO<sub>2</sub>-C<sub>10</sub> در دمای 37/8 °C [62] ..... 50
- شکل (9-4): مقدار محاسبه شده کشش بین سطحی برای مخلوط نفت شامل C<sub>1</sub> 25% و C<sub>10</sub> 75% با گاز خالص CO<sub>2</sub> [62] ..... 51
- شکل (10-4): مقدار محاسبه شده کشش بین سطحی برای مخلوط نفت شامل C<sub>1</sub> 25% و C<sub>4</sub> 50% و C<sub>10</sub> 25% با گاز خالص C<sub>1</sub> [62] ..... 52
- شکل (11-4): مقدار محاسبه شده کشش بین سطحی برای مخلوط نفت شامل C<sub>1</sub> 25% و C<sub>4</sub> 50% و C<sub>10</sub> 25% با گازی شامل CO<sub>2</sub> 50% و C<sub>1</sub> 50% [62] ..... 53
- شکل (12-4): مقدار کشش بین سطحی محاسبه شده برای مخلوط نفت A و گاز A از زیرک در دمای 85 °C [62] ..... 54
- شکل (13-4): طول خط رابط بر حسب شماره سلول برای سیستم شماره 1 [67] ..... 57
- شکل (14-4): طول خط رابط بر حسب فشار برای سیستم شماره 1 [67] ..... 57

- شکل (1-5): الگوریتم محاسبه فلش چند جزئی ..... 61
- شکل (2-5): الگوریتم محاسبه کشش بین سطحی از روش پاراگر ..... 64
- شکل (3-5): الگوریتم محاسبه کشش بین سطحی از روش گرادیان ..... 65
- شکل (4-5): نمایی از روش تولید سلول ..... 70
- شکل (5-5): الگوریتم محاسبه حداقل فشار امتزاجی ..... 72
- شکل (6-5): دانسیته بر حسب فشار در ترکیب نفت به گاز 0/5 برای سیستم شماره 1 ..... 76
- شکل (7-5): کشش بین سطحی بر حسب فشار تک سلولی در ترکیب نفت به گاز 0/5، سیستم شماره 1 ..... 76
- شکل (8-5): کشش بین سطحی بر حسب فشار چند سلولی برای سیستم شماره 1 ..... 77
- شکل (9-5): طول خط رابط بر حسب فشار چند سلولی برای سیستم شماره 1 ..... 77
- شکل (10-5): کشش بین سطحی بر حسب شماره سلول در آخرین تماس برای سیستم شماره 1 ..... 78
- شکل (11-5): طول خط رابط بر حسب شماره سلول در آخرین تماس برای سیستم شماره 1 ..... 78
- شکل (12-5): مقدار  $K-Value$  بر حسب شماره سلول در آخرین تماس برای سیستم شماره 1 ..... 79
- شکل (13-5): دانسیته بر حسب فشار در ترکیب نفت به گاز 0/5 برای سیستم شماره 2 ..... 81
- شکل (14-5): کشش بین سطحی بر حسب فشار تک سلولی در ترکیب نفت به گاز 0/5، سیستم شماره 2 ..... 81
- شکل (15-5): کشش بین سطحی بر حسب فشار چند سلولی برای سیستم شماره 2 ..... 82
- شکل (16-5): طول خط رابط بر حسب فشار چند سلولی برای سیستم شماره 2 ..... 82
- شکل (17-5): کشش بین سطحی بر حسب شماره سلول در آخرین تماس برای سیستم شماره 2 ..... 83
- شکل (18-5): طول خط رابط بر حسب شماره سلول در آخرین تماس برای سیستم شماره 2 ..... 83
- شکل (19-5): مقدار  $K-Value$  بر حسب شماره سلول در آخرین تماس برای سیستم شماره 2 ..... 84
- شکل (20-5): دانسیته بر حسب فشار در ترکیب نفت به گاز 0/5 برای سیستم شماره 3 ..... 86
- شکل (21-5): کشش بین سطحی بر حسب فشار تک سلولی در ترکیب نفت به گاز 0/5، سیستم شماره 3 ..... 86
- شکل (22-5): کشش بین سطحی بر حسب فشار چند سلولی برای سیستم شماره 3 ..... 87
- شکل (23-5): طول خط رابط بر حسب فشار چند سلولی برای سیستم شماره 3 ..... 87
- شکل (24-5): کشش بین سطحی بر حسب شماره سلول در آخرین تماس برای سیستم شماره 3 ..... 88
- شکل (25-5): طول خط رابط بر حسب شماره سلول در آخرین تماس برای سیستم شماره 3 ..... 88
- شکل (26-5): مقدار  $K-Value$  بر حسب شماره سلول در آخرین تماس برای سیستم شماره 3 ..... 89
- شکل (27-5): دانسیته بر حسب فشار در ترکیب نفت به گاز 0/5 برای سیستم شماره 1 ..... 92
- شکل (28-5): کشش بین سطحی بر حسب فشار تک سلولی در ترکیب نفت به گاز 0/5، سیستم شماره 4 ..... 92
- شکل (29-5): کشش بین سطحی بر حسب فشار چند سلولی برای سیستم شماره 4 ..... 93
- شکل (30-5): طول خط رابط بر حسب فشار چند سلولی برای سیستم شماره 4 ..... 93

- شکل (5-31): کشش بین سطحی بر حسب شماره سلول در آخرین تماس برای سیستم شماره 4 ..... 94
- شکل (5-32): طول خط رابط بر حسب شماره سلول در آخرین تماس برای سیستم شماره 4 ..... 94
- شکل (5-33): مقدار *K-Value* بر حسب شماره سلول در آخرین تماس برای سیستم شماره 4 ..... 95
- شکل (5-34): دانسیته بر حسب فشار در ترکیب نفت به گاز 0/5 برای سیستم شماره 5 ..... 97
- شکل (5-35): کشش بین سطحی بر حسب فشار تک سلولی در ترکیب نفت به گاز 0/5، سیستم شماره 5 ..... 97
- شکل (5-36): کشش بین سطحی بر حسب فشار چند سلولی برای سیستم شماره 5 ..... 98
- شکل (5-37): طول خط رابط بر حسب فشار چند سلولی برای سیستم شماره 5 ..... 98
- شکل (5-38): کشش بین سطحی بر حسب شماره سلول در آخرین تماس برای سیستم شماره 5 ..... 99
- شکل (5-39): طول خط رابط بر حسب شماره سلول در آخرین تماس برای سیستم شماره 5 ..... 99
- شکل (5-40): مقدار *K-Value* بر حسب شماره سلول در آخرین تماس برای سیستم شماره 5 ..... 100
- شکل (5-41): دانسیته بر حسب فشار در ترکیب نفت به گاز 0/5 برای سیستم شماره 6 ..... 103
- شکل (5-42): کشش بین سطحی بر حسب فشار تک سلولی در ترکیب نفت به گاز 0/5، سیستم شماره 6 ..... 103
- شکل (5-43): کشش بین سطحی بر حسب فشار چند سلولی برای سیستم شماره 6 ..... 104
- شکل (5-44): طول خط رابط بر حسب فشار چند سلولی برای سیستم شماره 6 ..... 104
- شکل (5-45): دانسیته بر حسب فشار در ترکیب نفت به گاز 0/5 برای سیستم شماره 7 ..... 106
- شکل (5-46): کشش بین سطحی بر حسب فشار تک سلولی در ترکیب نفت به گاز 0/5، سیستم شماره 7 ..... 106
- شکل (5-47): کشش بین سطحی بر حسب فشار چند سلولی برای سیستم شماره 7 ..... 107
- شکل (5-48): طول خط رابط بر حسب فشار چند سلولی برای سیستم شماره 7 ..... 107

## چکیده

حداقل فشار امتزاجی ( $MMP$ ) یکی از پارامترهای مهم در ازدیاد برداشت از مخازن نفتی در دوره سوم برداشت است. به دلیل اهمیت این پارامتر روش‌های متفاوت آزمایشگاهی و نظری برای تعیین و محاسبه آن ارائه شده است، اما با توجه به هزینه بر بودن روش‌های آزمایشگاهی، تحقیق در مورد روش‌های نظری برای محاسبه این پارامتر ادامه دارد. در این تحقیق از روش صفر کردن کشش بین سطحی برای محاسبه  $MMP$  استفاده شده است. روش محاسبه به این صورت است که ابتدا مطابق یک الگوریتم خاص ناحیه‌ای که در آن تزریق گاز اثر داشته به تعدادی سلول تقسیم می‌شود تا به این ترتیب معنای تماس چند گانه رعایت شده باشد، سپس برای هر کدام از سلول‌ها محاسبات فلش انجام می‌شود تا وضعیت ترمودینامیکی سیستم مشخص شود. حال مقدار کشش بین سطحی برای هر کدام از سلول‌ها به کمک یکی از روش‌های نظری محاسبه کشش بین سطحی محاسبه می‌شود. در این تحقیق از دو روش پاراکر و نظریه گرادیان برای محاسبه کشش بین سطحی استفاده شده است. روش پاراکر روشی ساده و در مقابل روش نظریه گرادیان روشی پیچیده در محاسبه کشش بین سطحی است. پس از محاسبه کشش بین سطحی برای سلول‌ها، مقدار مینیمم شناسایی می‌شود و در صورتی که این مقدار کمتر از  $10^{-6}$  نیوتن بر متر باشد، فشاری که در آن محاسبه انجام شده است به عنوان  $MMP$  گزارش می‌شود و در غیر این صورت فشار افزایش یافته و محاسبات تکرار می‌شود تا شرط فوق برآورده شود. به این ترتیب مقدار  $MMP$  محاسبه می‌شود. با توجه به نتایج به دست آمده حاصل از آزمایش این روش برای چند سیستم، می‌توان گفت که این روش می‌تواند با دقت خوبی  $MMP$  را محاسبه نماید. کلیه محاسبات این پروژه با برنامه نویسی به زبان MATLAB انجام شده است و از نتایج هیچ نرم‌افزار از قبل طراحی شده‌ای استفاده نشده است.



## فصل اول:

مقدمه، هدف از انجام تحقیق

## 1-1- مقدمه

همواره به دلیل اینکه نیروی خود به خودی رانش نفت برای بیرون آمدن از زمین کم بوده مقدار زیادی از نفت (حدود 70 تا 90 درصد) در مخزن باقی می‌ماند، بنابراین ارائه راهکارهایی برای استخراج این مقدار نفت امری ضروری است. پس از پایان مرحله اول برداشت، دوره دوم برداشت با اعمال روش‌هایی خاص آغاز می‌شود. در این دوره با تزریق آب و یا گاز به منطقه خالی شده از سیال مخزن سعی در حفظ فشار مخزن می‌شود تا به این ترتیب بتوان حدود 10 تا 30 درصد دیگر نیز از سیال مخزن را استخراج کرد. پس از پایان این دوره بیش از 60% نفت در مخزن باقی مانده است. برای استخراج قسمتی از این مقدار نفت، روش‌هایی پیشنهاد می‌شود تا به کمک آن‌ها بتوان یک دوره دیگر (دوره سوم) هم از مخزن برداشت کرد. از جمله این روش‌ها می‌توان به روش تزریق امتزاجی اشاره کرد. در تزریق امتزاجی گازی با شرایط خاص به درون سیال مخزن تزریق می‌شود تا با سیال مخزن تولید یک تک فاز کند. این تک فاز یک جبهه برای روبش نفت جلوی راه خود است. در تزریق امتزاجی یکی از مهمترین پارامترهای تاثیرگذار، کشش بین سطحی است. در واقع هنگام امتزاج سیال مخزن و گاز تزریقی کشش بین سطحی آنها به صفر میل می‌کند و این شرط امتزاج است. برای حصول این شرایط باید گاز را با فشاری خاص به مخزن تزریق کرد. فشار گاز را افزایش می‌دهیم تا امتزاج حاصل شود. به اولین فشاری که در آن کشش بین سطحی به صفر رسیده و امتزاج حاصل می‌شود، حداقل فشار امتزاجی<sup>1</sup> یا *MMP* می‌گویند، بنابراین پارامتر کلیدی که باید برای رسیدن به امتزاج در مخزن مورد محاسبه قرار گیرد، *MMP* است.

<sup>1</sup> Minimum Miscibility Pressure

## 1-2- هدف از انجام تحقیق

برای محاسبه حداقل فشار امتزاجی روش‌های گوناگونی پیشنهاد شده است. برخی از این روش‌ها آزمایشگاهی و برخی دیگر نظری است. در بین روش‌های نظری در تعیین حداقل فشار امتزاجی محققان بسیاری روش خط رابط<sup>1</sup> را انتخاب کرده و با صفر کردن طول خط رابط، *MMP* را محاسبه کرده‌اند. واقعیت این است که درست است که طول خط رابط صفر یعنی جایی که امتزاج رخ می‌دهد و فشار متناسب با آن *MMP* است ولی طول خط رابط یک مفهوم ترمودینامیکی دارد، در حالی که کشش بین سطحی صفر امتزاج پذیری را در ذهن تداعی می‌کند. در سال 2003 رائو و لی<sup>2</sup> برای اولین بار این مفهوم را در آزمایشگاه پیاده کردند و با اضافه کردن تدریجی گاز به سلول حاوی نفت و عکس برداری از قطره نفت آویزان در جائیکه قطره ناپدید شد، مقدار *MMP* را گزارش کردند. در سال 2007 اور و جسن<sup>3</sup> این مفهوم را در قالب یک الگوریتم نظری آوردند و به کمک این الگوریتم مقدار *MMP* را محاسبه کردند. همچنین آن‌ها در نسبت‌های مختلف نفت و گاز کشش بین سطحی بر حسب فشار را رسم کردند، سپس با آنچه از اطلاعات قبلی در مورد *MMP* موجود بود، بیان می‌کردند که در کدام نسبت به *MMP* می‌رسیم. در واقع امکان محاسبه *MMP* به صورت مستقیم وجود نداشت. ایراد دیگر برون‌یابی انجام شده برای کشش بین سطحی صفر بود در حالیکه این مقدار باید خود در محاسبات حاصل شود. این روش ایرادات دیگری نیز دارد که در فصل 4 به آن اشاره خواهد شد. بنابراین بر آن شدیم تا مقدار کشش بین سطحی صفر را بدون استفاده از برون‌یابی و مستقیماً محاسبه نمائیم. در این روش با ارائه یک الگوریتم برای محاسبه *MMP* در جایی که کشش بین سطحی به صفر می‌رسد، مقدار *MMP* خوانده می‌شود. آزمایش این الگوریتم برای چندین مورد مخلوط نفت و گاز و به دست آوردن نتایج قابل قبول با خطایی اندک نسبت به مقدار *MMP* واقعی مشخص می‌کند که این الگوریتم می‌تواند دقت بالایی در محاسبات حداقل فشار امتزاجی داشته باشد.

<sup>1</sup> Tie-line

<sup>2</sup> Rao and Lee

<sup>3</sup> Orr and Jessen



با توجه به آن که می‌خواهیم مقدار حداقل فشار امتزاجی را با صفر کردن کشش بین سطحی محاسبه کنیم، ابتدا در فصل آینده (فصل دوم) به معرفی پارامتر کشش بین سطحی پرداخته و روش‌های آزمایشگاهی و نظری برای اندازه‌گیری این پارامتر مهم بیان می‌شود. در فصل سوم امتزاج‌پذیری را تعریف کرده و پس از آن انواع مکانیسم‌های رانش و روش‌های مختلف آزمایشگاهی و نظری اندازه‌گیری *MMP* توصیف می‌شود. در فصل چهارم نتایج به دست آمده از محاسبه کشش بین سطحی و همچنین روش‌های محاسبه *MMP* توسط محققان در سال‌های اخیر را بیان کرده و روش آن‌ها را نیز در تعیین و یا محاسبه این کمیت خواهیم گفت. در نهایت در فصل پنجم روش محاسبه *MMP* بیان می‌شود. در این فصل الگوریتم‌های محاسبه فلش چند جزئی، محاسبه کشش بین سطحی با روش پاراکر<sup>1</sup>، محاسبه کشش بین سطحی با روش نظریه گرادیان<sup>2</sup> و الگوریتم محاسبه *MMP* ارائه می‌شود و معادلات به کار رفته در محاسبات نیز آورده می‌شود. پس از آن چند سیستم نفت و گاز مورد بررسی قرار گرفته و برای آن‌ها حداقل فشار امتزاجی محاسبه می‌شود. برای هر سیستم ابتدا مشخصات سیستم شامل ترکیب درصد اجزا در فاز نفت و گاز و همچنین دما و مکانیسم رانش بیان شده و سپس 7 نمودار که به ترتیب بیان‌کننده دانسیته بر حسب فشار، کشش بین سطحی بر حسب فشار در حالت تک تماسی، کشش بین سطحی بر حسب فشار در حالت چند تماسی، طول خط رابط بر حسب فشار در حالت چند تماسی، کشش بین سطحی بر حسب شماره سلول، طول خط رابط بر حسب شماره سلول و در نهایت مقدار *K-Value* بر حسب شماره سلول رسم می‌شود تا به این ترتیب هم مقدار *MMP* محاسبه شود، هم سازگاری روش خط رابط با روش حاضر بررسی شده و هم وضعیت ترمودینامیکی سیستم بیان شود. در انتهای فصل نیز به بحث و بررسی نتایج و مزایا و معایب این روش پرداخته و نیز پیشنهادهای برای ادامه انجام این پروژه داده می‌شود.

---

<sup>1</sup> Parachor<sup>2</sup> Gradient Theory

## فصل دوم:

### کشش بین سطحی،

### روش های آزمایشگاهی و نظری برای اندازه گیری آن

در این فصل می خوانید:

- کشش بین سطحی چیست؟
- تاریخچه ارائه روابط برای محاسبه کشش بین سطحی
- روش های آزمایشگاهی برای اندازه گیری کشش بین سطحی
- روش های نظری برای محاسبه کشش بین سطحی

## 2-1- کشش بین سطحی چیست؟

همواره به دلیل وجود نیروهای بین مولکولی موجود در سطح که دارای برآیندی مخالف با صفر هستند، نیرویی در سطح ایجاد می‌شود. این نیرو همان کشش سطحی است و به این صورت تعریف می‌شود: نیروی وارده بر واحد طول فصل مشترک دو سیال (بخار- مایع) (کشش بین سطحی<sup>1</sup>) و گاز- مایع (کشش سطحی<sup>2</sup>) و آن را با  $S$  نشان می‌دهند. واحد کشش سطحی  $N/m$  در سیستم اندازه‌گیری SI و یا  $dyne/cm$  در سیستم cgs است. تراوش نسبی که رفتار جریان‌های چندفازی را در سنگ‌های یک مخزن توصیف می‌کند، همگی تحت تاثیر این پدیده است. کشش سطحی تعادلات فازی را هم تحت تاثیر قرار می‌دهد. در سیستم‌های دو فازی بخار- مایع برای بررسی خواص فصل مشترک، فصل مشترک را فازی جداگانه و برای آن خواصی مابین خواص بخار و مایع در نظر می‌گیرند. کشش سطحی در مخازن نفتی نیز نقش مهمی را ایفا می‌کند. در جریان تزریق گاز به یک مخزن نفتی برای ازدیاد برداشت از مخزن، زمانی که کشش سطحی نفت و گاز تزریقی در فصل مشترک به صفر برسد، ماکزیمم مقدار برداشت از مخزن حاصل خواهد شد. در مورد اثر فشار بر مقدار کشش سطحی باید گفت که همواره با افزایش فشار به سمت فشار بحرانی، مقدار کشش سطحی کاهش پیدا می‌کند تا این که در فشار بحرانی مقدار آن به صفر میل کند. اثر دما بر مقدار کشش سطحی به این صورت است که معمولاً مقدار کشش سطحی با افزایش دما کاهش می‌یابد، البته موارد استثنایی هم وجود دارد. در مورد میعانات گازی با کاهش دما مقدار کشش سطحی کاهش می‌یابد [1].

## 2-2- تاریخچه ارائه روابط برای محاسبه کشش بین سطحی

یکی از راه‌های بیان کشش در سطح یک مایع، بررسی پدیده کشش سطحی و تعیین مقدار کمی برای آن است. در مقیاس مولکولی می‌توان یک مرز بین مایع و بخار به عنوان فاز سوم در نظر گرفت که این فاز سوم دارای خواصی بین خواص مایع و بخار است. برای مولکول‌های داخل مایع برآیند نیروهای وارد بر هر یک از مولکول‌ها صفر است ولی برای مولکول‌های واقع بر فصل

<sup>1</sup> Interfacial Tension

<sup>2</sup> Surface Tension

مشترک این گونه نیست. نیروهایی از طرف مایع مولکول‌های فصل مشترک را به داخل توده مایع می‌کشاند و نیروهایی نیز از طرف بخار این مولکول‌ها را به سمت فاز بخار می‌کشاند. در دانسیته‌های پایین نیروهای وارده از طرف مایع بیشتر از نیروهای وارده از طرف بخار بر مولکول‌های فصل مشترک است و لذا این مولکول‌ها تمایل بیشتری برای برگشتن به توده مایع دارند. همواره تمایلی در فصل مشترک وجود دارد که مساحت این سطح را به حداقل برساند. مقدار این تمایل بستگی به جرم کل، شکل ظرف و نیروهای خارجی دارد. کشش سطحی کمک می‌کند تا بتوانیم برآوردی کمی از این نیروها داشته باشیم. تا به حال روش‌های مختلفی برای تخمین کشش سطحی در مورد مایعات خالص و مخلوط‌های مایع ارائه شده است. مروری بر این روش‌ها در سال 1964 توسط هیرچ فلدر<sup>1</sup> و همکارانش انجام شد. یکی از ساده‌ترین این روابط فرمول تجربی است که توسط مک‌لئود<sup>2</sup> (1923) ارائه شده است. او بیان کرد که کشش سطحی برای یک مایع خالص در حال تعادل با بخار خودش تابعی از دانسیته‌های مایع و بخار است. رابطه ارائه شده به صورت زیر است:

$$\sigma = K(\rho_l - \rho_v)^4 \quad (1-2)$$

در این رابطه  $K$  یک ثابت بوده و مستقل از دماست. در سال 1924 ساگدن<sup>3</sup> این رابطه را به شکل زیر اصلاح کرد:

$$s = [P.(r_l - r_v)]^4 \quad (2-2)$$

اگر این رابطه را با رابطه ارائه شده توسط مک‌لئود مقایسه کنیم، می‌بینیم که ساگدن  $K$  را برابر  $P^4$  گرفته است. ساگدن پارامتر  $P$  را پاراکر<sup>4</sup> نامید. او همچنین بیان کرد که پاراکر مستقل از دماست و روشی نیز برای تخمین آن با توجه به ساختار مولکولی ارائه کرد. در سال 1953 دانشمندی به نام قایله<sup>5</sup> با توجه به داده‌های تجربی برای دانسیته و کشش سطحی مقدار پاراکر

<sup>1</sup> Hirschfelder

<sup>2</sup> Macleod

<sup>3</sup> Sugden

<sup>4</sup> Parachor

<sup>5</sup> Quayle