



Experimental Study of Surfactant Type Effects on the Foam Stability and Mobility With the Approach of Enhancing Oil Recovery

S. M. Razavi, M. M. Shahmardan, M. Nazari*, M. Norouzi

Department of Mechanical engineering, University of Shahrood, Shahrood, Iran

ABSTRACT: One of the methods to enhance oil recovery is the injection of foam into oil reservoirs. The most important restriction on the use of foam in enhancing oil recovery methods is maintaining its stability in the face of the oil phase. In this study, we tried to investigate the factors affecting the foam stability and its apparent viscosity by making laboratory setups. The stability of the bulk foam has been studied by measuring the height variation of the foam types within the vertical column. The stability of the foam bubbles has been investigated by making a transparent Hele-Shaw cell equipped with pressure sensors. The results show that the type of surfactant has a significant effect on the stability of the foam bubbles. Initially, sodium dodecyl sulfate and cocamide propyl hydroxyl sultaine foams showed the highest stability in the presence and absence of oil, respectively. But with the 1: 1 combination of them, the foam stability significantly increases. The results show that foam with a finer texture has a higher viscosity. Also, the quality of the foam directly, and the foam flow rate adversely, affect its apparent viscosity; however, as the foam flow rate increases, its dependence on foam quality is greatly reduced.

Review History:

Received: 2019-01-31

Revised: 2019-09-04

Accepted: 2019-09-22

Available Online: 2019-10-25

Keywords:

Oil recovery

Experimental study

Surfactant

Foam stability

1. INTRODUCTION

The use of foam is one of the alternative ways to improve oil recovery. The presence of foam bubbles significantly increases its viscosity relative to that of pure gas [1]. The high viscosity of the foam in the oil phase displacement process reduces the mobility ratio between the displacing fluid and the displacement fluid. By reducing the mobility ratio, the gas can penetrate the low permeability streaks and allow better oil displacement [2]. The foam is thermodynamically unstable. Foam instability is due to the tendency to decrease the free energy of the lamellae surfaces. Therefore, the most important challenge in using foam is to maintain its stability.

2. METHODOLOGY

To prepare a surfactant solution, distilled water and four different surfactants with 0.5wt% concentration, were used. The surfactants were used with their specifications are shown in Table 1.

Experiments have been performed on the bulk and bubble scales, respectively, in the chromatography column and the Hele-Shaw cell. Foam revolution has been studied by imaging them and Image analysis has been performed using MATLAB software.

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1. Stability of foam, bulk scale results

The main criterion for foam stability in the bulk scale experiments is its half-life (i.e. the elapsed time until the

*Corresponding author's email: nazari_me@yahoo.com

foam height is reduced to half the initial value). A longer half-life will indicate greater foam stability and vice versa. This criterion has so far been used in previous research [7-9]. Fig. 1 compares the half-life of different foams in the presence and absence of the oil.

According to Fig. 1, the unstable effect of the oil phase of the Decane and the reduction of the foam half-life is evident for all the surfactants used in this study. By ranking the stability of different foams in the presence of the Decane, CTAB and CAPBSDS have recorded the lowest and highest stability, respectively.

3.2. Stability of foam, bubble scale results

In this section, the coarsening and rupturing of bubbles which affect the foam stability have been studied. To quantify the dynamics and identify foam at the bubble scale, the normalized number of bubbles (the number of bubbles at each time divided by the number of bubbles at the start of the experiment) was calculated for each foam. Fig. 2 depicts the normalized number of bubbles for different foams over time.

According to the graph slope, the rate of bubble reduction of all foams at the beginning of the experiments was very high, but over time, the slope decreased, indicating the relative stability of the bubbles.

Fig. 2 shows that the least bubble coarsening is attributed to CAPBSDS foam. This is due to its high stability, which can be related to the thickness of the lamellar films. Since the cell is horizontal and the gravitational force does not play a role in the fluid discharge from the lamellae, the thicker lamellae



Table 1. Properties of surfactant solution (0.5% Concentration) used in our experiment

Commercial name	Viscosity (mPa.s)	Surface tension (mN. m ⁻¹)	Name	Supplier
SDS	1.177	34.23	Sodium Dodecyl Sulfate	Merck
CTAB	1.157	37.41	Cetyl Trimethyl Ammonium Bromide	Merck
AOS	1.244	36.26	Alpha Olefin Sulfonate	PSG
CAPB	1.247	34.44	Cocamido Propyl Hydroxyl Sultaine	PSG
CAPBSDS	1.182	31.71	SDS 1:1 CAPB	-

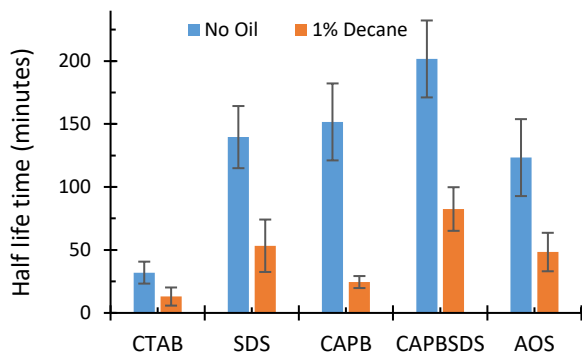


Fig. 1. The half-decay times of foams in the absence and presence of Decane

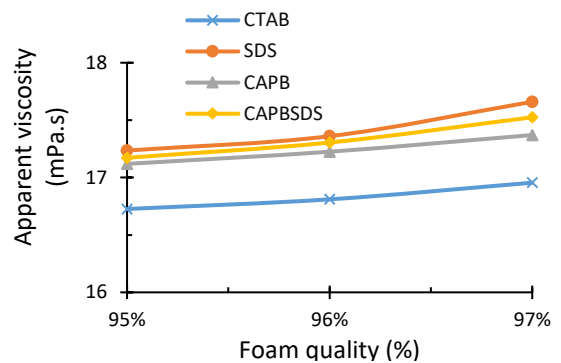


Fig. 3. The relation between foam quality, surfactant type and apparent viscosity of foams

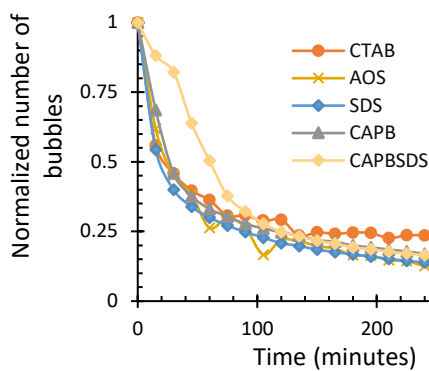


Fig. 2. Normalized number of bubbles

are more resistant to gas diffusion within the bubble and thus the foam will be more stable. The results of this section are in agreement with the results observed in Ref. [6].

3.3. Apparent viscosity

The experiments in this section calculate the apparent viscosity of the foam by injecting the foam into the cell and measuring the difference in inlet and outlet pressure. Fig. 3 shows the relationship between the quality of the foam and its apparent viscosity for different types of foam.

The results of Fig. 3 show that as the foam quality increases, its apparent viscosity increases, which is in agreement with

previous studies [6]. Because foam with a higher gas ratio (higher quality) requires more deformation to yield and flow. Therefore, the yielding stress is higher and therefore it has less mobility (higher viscosity) [7]. In addition, it can be seen in Fig. 3 that in constant quality, the SDS, CAPB and CAPBSDS foams have a higher viscosity than the CTAB foam. Since the viscosity of the surfactant solution of all the foams is about the same, the main difference between the viscosity of the CTAB foam compared to the other foams tested is its coarse texture. In the previous research [8], foam texture has been one of the parameters governing the apparent viscosity of the foam. For a fixed foam quality, the foam with finer texture has a higher apparent viscosity and vice versa. because the foam containing smaller bubbles requires more deformation stress (higher deformation stress implies higher viscosity). The above results show that the higher quality of the foam does not certainly equal its higher viscosity, and the texture of the foam and the material of the surfactant also affect it.

4- CONCLUSIONS

According to the experiments, the following results were observed:

1. The Type of surfactant has a significant effect on the foam stability, such that, by combining two or more surfactants can have a significant effect on its stability.

2. The foam texture characteristics (bubble number, bubble size distribution and average bubble size) affect its stability so that the smallest foam texture with the least amount of bubble

size changes can correspond to the highest foam stability.

3. The texture of the foam affects the apparent viscosity of the foam so that the foam with smaller bubbles has a higher viscosity.

REFERENCES

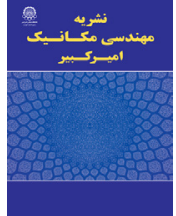
- [1] G.J. Hirasaki, J.B. Lawson, *Mechanisms of Foam Flow in Porous Media: Apparent Viscosity in Smooth Capillaries*, (1985).
- [2] K. Ma, R. Liontas, C.A. Conn, G.J. Hirasaki, S.L. Biswal, Visualization of improved sweep with foam in heterogeneous porous media using microfluidics, *Soft Matter*, 8(41) (2012) 10669-10675.
- [3] X. Duan, J. Hou, T. Cheng, S. Li, Y. Ma, Evaluation of oil-tolerant foam for enhanced oil recovery: Laboratory study of a system of oil-tolerant foaming agents, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 122 (2014) 428-438.
- [4] R. Aveyard, B.P. Binks, P.D.I. Fletcher, T.G. Peck, C.E. Rutherford, Aspects of aqueous foam stability in the presence of hydrocarbon oils and solid particles, *Advances in Colloid and Interface Science*, 48 (1994) 93-120.
- [5] M. Simjoo, T. Rezaei, A. Andrianov, P.L.J. Zitha, Foam stability in the presence of oil: Effect of surfactant concentration and oil type, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 438 (2013) 148-158.
- [6] K. Osei-Bonsu, N. Shokri, P. Grassia, Foam stability in the presence and absence of hydrocarbons: From bubble- to bulk-scale, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 481 (2015) 514-526.
- [7] K. Osei-Bonsu, N. Shokri, P. Grassia, Fundamental investigation of foam flow in a liquid-filled Hele-Shaw cell, *Journal of Colloid and Interface Science*, 462 (2016) 288-296.
- [8] W. Yan, C.A. Miller, G.J. Hirasaki, Foam sweep in fractures for enhanced oil recovery, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 282-283 (2006) 348-359.

HOW TO CITE THIS ARTICLE

S.M. Razavi, M.M. Shahmardan, M. Nazari, M. Norouzi, *Experimental Study of Surfactant Type Effects on the Foam Stability and Mobility With the Approach of Enhancing Oil Recovery*, *Amirkabir J. Mech Eng.*, 53(Special Issue 1)(2021) 85-88.

DOI: 10.22060/mej.2019.15736.6193





مطالعه آزمایشگاهی اثر نوع ماده سورفاکتانت بر پایداری و تحرک فوم با رویکرد ازدیاد برداشت نفت

سید محمد حسین رضوی، محمد محسن شاه مردان، محسن نظری*، محمود نوروزی

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۷-۱۱-۱۱
بازنگری: ۱۳۹۸-۰۶-۱۳
پذیرش: ۱۳۹۸-۰۶-۳۱
ارائه آنلاین: ۱۳۹۸-۰۸-۰۳

کلمات کلیدی:

برداشت نفت
مطالعه آزمایشگاهی
ماده سورفاکتانت
پایداری فوم

خلاصه: از جمله روش‌های نو ظهور در افزایش بازیافت نفت، تزریق فوم به درون مخازن نفتی است. مهم‌ترین محدودیت در استفاده از فوم در روش‌های بازیافت نفت، حفظ پایداری آن در مواجهه با فاز نفتی است. در این پژوهش سعی شده است تا با ساخت بسترهای آزمایشگاهی، عوامل موثر بر پایداری فوم و ویسکوزیته ظاهری آن بررسی گردد. پایداری توده فوم، با اندازه‌گیری تغییر ارتفاع انواع فوم درون ستون عمودی مطالعه شده است. پایداری حباب‌های فوم با ساخت یک سلول هل‌شاو شفاف مجهز به سنسورهای فشار بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد که نوع ماده سورفاکتانت اثر قابل توجهی در پایداری حباب‌های فوم دارد. در ابتدا فوم‌های سدیم دودسیل سولفات و کوکامیدوپروپیل هایدروکسی سولتین به ترتیب بیشترین پایداری را در حضور و عدم حضور نفت نشان دادند. اما با ترکیب ۱:۱ آن‌ها، پایداری فوم به میزان قابل ملاحظه‌ای افزایش یافت. نتایج مطالعات اثبات می‌کند فوم با بافت ریزتر، ویسکوزیته ظاهری بالاتری دارد. همچنین کیفیت فوم به‌طور مستقیم، و نرخ جریان فوم به‌طور معکوس بر ویسکوزیته ظاهری فوم تأثیر می‌گذارد؛ اما با افزایش نرخ جریان، وابستگی ویسکوزیته ظاهری به کیفیت فوم به شدت کاهش می‌یابد.

۱- مقدمه

طریق چاه تزریق است؛ لذا این روش کارایی و بازده اقتصادی لازم را از دست داده و می‌بایست از روش‌های دیگری استفاده شود. استفاده از فوم، از جمله راهکارهای جایگزین جهت بهبود بازیافت نفت است. سازگاری فوم در روش‌های ازدیاد برداشت به علت توانایی آن در کاهش نفوذپذیری نسبی گاز به وسیله حباب‌های محبوس در حفره‌های بستر متخلخل می‌باشد [۲]. حضور حباب‌های فوم، ویسکوزیته آن را نسبت به ویسکوزیته گاز خالص، به‌طور قابل ملاحظه افزایش می‌دهد [۳]. بالا بودن ویسکوزیته فوم در فرآیند جابجایی فاز نفتی، موجب کاهش نسبت تحرک بین سیال جابجا کننده و سیال جابجا شونده می‌شود. با کاهش نسبت تحرک، گاز می‌تواند به رگه‌های با نفوذپذیری پایین وارد شد و جابجایی نفت مطلوب‌تر صورت پذیرد [۲].

پس از استخراج طبیعی نفت و بهره‌گیری از تزریق آب، بخش قابل توجهی از نفت اولیه همچنان درون مخزن باقی می‌ماند. این نفت باقیمانده، هدف مهمی برای روش‌های افزایش بازیافت نفت است. از جمله روش‌های ازدیاد برداشت، تزریق گاز به درون مخزن است؛ اما به دلیل اختلاف زیاد ویسکوزیته بین گاز تزریقی و نفت مخزن، تحرک فاز گازی بیشتر بوده که منجر به ایجاد پدیده انگشتی لزج و افزایش کانال‌زنی درون بستر متخلخل می‌شود. در این شرایط، گاز تزریق شده ترجیح می‌دهد بدون تماس با بخش قابل توجهی از نفت، از رگه‌های با نفوذپذیری بالا عبور کند [۱]. در نتیجه عدم جاروب مناسب، سیال خروجی از چاه تولید تقریباً همان سیال تزریق شده به داخل مخزن از *نویسنده عهده‌دار مکاتبات: nazari_me@yahoo.com

سورفاکتانت، خصوصیات حباب، کیفیت فوم، فشار جدایش و فاز نفتی را نام برد. از مهم‌ترین عوامل در میان فاکتورهای پایداری فیلم لاملایی، فشار جدایش (Π) است. فشار جدایش، اختلاف فشار بین فاز گاز و فاز مایع درون فیلم لاملایی است. از جمله عوامل تأثیرگذار بر فشار جدایش، ضخامت فیلم لاملایی است.

از مهم‌ترین چالش‌های استفاده از فوم در افزایش بازیافت نفت، پایداری و طول عمر آن در حضور نفت خام است. پایداری فوم در بستر متخلخل، وابسته به پایداری فیلم‌های آن است. تأثیرات ناپایداری نفت بر فیلم‌های فوم، نتیجه‌ای از اثر متقابل سطح مستقیم بین نفت و فوم است، که خصوصیات فیزیکی-شیمیایی متنوعی در تعیین آن تأثیر گذار است. این اثرات متقابل به وسیله سه مکانیزم اصلی زیر بیان می‌شوند [۷]:

۱. ورود قطره نفت به سطح مشترک گاز-مایع
۲. پخش نفت روی سطح مشترک
۳. تشکیل یک پل ناپایدار در میان لاملایی

تاکنون پایداری و کارایی فوم، با استفاده از بسترهای مختلف آزمایشگاهی مطالعه و بررسی شده است. یکی از روش‌های متداول در این زمینه، پایش تغییر ارتفاع حجم فوم درون ستون عمودی است [۱۰-۸]. از جمله تحقیقات صورت گرفته، شکراللهی و همکاران [۱۱] در ستون کروماتوگرافی عمودی، اثر نوع ماده سورفاکتانت و تأثیر خصوصیات فاز نفتی را بر پایداری فوم تحقیق کرد. ایشان با مقایسه میزان فوم‌سازی و پایداری فوم‌های مختلف مشاهده کرد که بیشترین پایداری مربوط به فوم اس‌دی‌اس^۵ بوده و پس از آن فوم سی‌تب^۶ قرار دارد. نتایج مطالعه دیگری نشان داد، مخلوط ۱:۱ سورفاکتانت‌های اس‌دی‌اس و کوکابتائین^۷، به دلیل افزایش فشار موینگی بحرانی فیلم‌های فوم توسط بتائین و داشتن ویسکوزیته بالای محلول سورفاکتانت (که کند کننده تخلیه مایع از مرزهای پلاتیو و افزایش مقاومت نازک شدن فیلم است)، موجب افزایش پایداری فوم در حضور فاز نفتی می‌شود [۱۲].

در تحقیق دیگری گزارش شده است که فوم ساخته شده از سورفاکتانت آاواس^۸ بیشترین پایداری را در حضور فاز نفتی دارد [۱۳]؛ اما تحقیقات برخی محققان نشان داده است، سورفاکتانت آاواس

فوم یک مخلوط مایع-گاز است که در آن فاز گازی در یک فاز مایع پیوسته، پراکنده شده است. فاز گازی درون فوم، به وسیله فیلم‌های نازکی از مایع به نام لاملایی^۱ یا فیلم فوم، محبوس و منقطع شده است. فیلم‌های مایع و فاز گازی بین آن‌ها، ساختار اصلی فوم (حباب) را تشکیل می‌دهند. نسبت نرخ جریان گاز (Q_g)، به مجموع نرخ‌های جریان مایع و گاز ($Q_{liq} + Q_g$) تعیین‌کننده کیفیت فوم (f) بوده و به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$f = \frac{Q_g}{Q_g + Q_{liq}} \quad (1)$$

فوم به صورت ترمودینامیکی ناپایدار است، و سیر تحولات آن در طول زمان بازگشت‌ناپذیر است. ناپایداری فوم به دلیل گرایش به کاهش انرژی آزاد سطوح مشترک لاملایی است. به دلیل اختلاف فشار بین حباب‌های نامساوی، گاز از حباب‌های کوچک‌تر به حباب‌های بزرگ‌تر مجاور پخش شده و موجب درشت شدن حباب‌ها می‌شود [۴]. این گرایش به همراه فشار اسمزی^۲ در انتها موجب جدایی فازهای گاز و مایع، و نابودی فوم می‌شود [۵]. به عبارت دیگر، در طول زمان فوم خود به خود درشت شده، و در نهایت به علت تخلیه مایع از لاملایی و مرزهای پلاتیو^۳ (تقاطع لاملایی‌ها) و مکش موئینگی، فرو می‌پاشد [۶]. به دلیل وجود سطح مشترک فاز مایع با گاز، خصوصیات ترمودینامیکی فیلم‌های نازک از خصوصیات ماکروسکوپی فازهای مایع و گاز متناظر، متفاوت است. بر طبق نظریه کلاسیک دی‌ال‌وی‌او^۴، اثر متقابل سطوح فیلم‌های فوم، موجب ایجاد نیروهای جدایش (نیروهای الکترواستاتیک مثبت دافعه و ون‌دروالس منفی جاذبه بین مولکولی) می‌شود. این نیروها، در جایی که مولکول سورفاکتانت حضور ندارد غالب شده، و موجب نازک شدن فیلم‌های فوم و نابودی لاملایی‌ها می‌شوند. به محض ورود سورفاکتانت، مولکول‌های آن بر روی سطح مشترک گاز-مایع جذب می‌شوند. جذب سورفاکتانت، یک لایه دابل الکتریکی، که منبع نیروی پایدار کننده لاملایی است، را نتیجه می‌دهد [۷]. نظریه دی‌ال‌وی‌او به دلیل نادیده گرفتن سایر نیروها در پایداری فیلم‌های فوم کاربرد محدودی دارد؛ زیرا پایداری فوم تحت تأثیر عوامل زیادی است که از مهم‌ترین آن می‌توان ساختمان

5 SDS (Sodium Dodecyl Sulfate)
6 CTAB (Cetyl Trimethyl Ammonium Bromide)
7 Cocobetaine (Cocamidopropyl betaine)
8 AOS (Alpha Olefin Sulfonate)

1 Lamellae
2 Osmotic
3 Plateau
4 DLVO

شده است. در تحقیقات دیگری درون ستون عمودی شفاف، پایداری فوم در حضور ذرات جامد مخازن هیدروکربنی بدون حضور فاز نفتی بررسی شده است. در مقیاس انباشته تغییر ارتفاع فوم اندازه‌گیری شده است. در مقیاس میکرو، اندازه میانگین حباب و ساختمان حباب‌ها و ذرات جامد مطالعه شد. ایشان نتیجه گرفتند علاوه بر رطوبت‌پذیری و دانسیته ذرات جامد، شکل و اندازه آن‌ها نیز بر پایداری فوم آوایس تأثیر گذار است [۱۸].

در تحقیقات اوپارد [۱۹]، عامل اصلی در پایداری فوم، وزن مولکولی عامل نفتی بیان شده است؛ به طوری که با کاهش وزن مولکول قطره نفت، طول عمر فیلم‌های فوم کاهش می‌یابد. اما در پژوهش دیگر، پایداری فوم در حضور فاز نفتی، وابسته به فیلم‌های پزیدوایمالشن تشکیل شده بین قطره نفت و فاز گازی در نظر گرفته شده است؛ به طوری که پایداری فوم وابسته به پایداری فیلم‌های پزیدوایمالشن^۲ است. لذا اثر مخرب فاز نفتی در سطح مشترک گاز-مایع، تنها هنگامی که فیلم پزیدوایمالشن پاره می‌شود اثر کرده و نفت پخش یا پل‌زنی می‌کند [۲۰].

از دیگر موضوعات مورد توجه محققین، بررسی عوامل تأثیرگذار بر ویسکوزیته ظاهری فوم بوده است. آزمایشات انجام شده، وابستگی ویسکوزیته ظاهری فوم به کیفیت فوم، بافت فوم و نرخ تزریق جریان را آشکار کرده است [۳ و ۲۱]. بر طبق مطالعات انجام شده، ویسکوزیته ظاهری فوم برآیند سه عامل زیر است [۳]:

۱. ویسکوزیته مایع اسلاگ بین حباب‌های گاز
 ۲. اثرات سطح مشترک بین فازها
 ۳. مقاومت جریان به علت گرادبان تنش سطحی در حباب‌ها
- برخی از محققین بافت فوم را مهم‌ترین عامل بر ویسکوزیته فوم دانسته‌اند. نتایج ایشان نشان می‌دهد فوم با بافت درشت‌تر، ویسکوزیته ظاهری بیشتری دارد [۲۱]. اما در تناقض با این نتایج، آزمایشات اسی‌بنسو درون سلول هل‌شاو [۲۲] نشان داد فوم با حباب‌های کوچکتر (در کیفیت ثابت)، ویسکوزیته ظاهری بالاتری دارد. به علاوه در تحقیقات ایشان مشاهده شد ویسکوزیته فوم با افزایش کیفیت فوم و یا کاهش نرخ جریان، افزایش می‌یابد [۲۲]. همچنین محققان دیگری تأثیر چندین عامل از جمله بافت و کیفیت فوم بر روی ویسکوزیته ظاهری فوم را تحقیق کردند. آن‌ها نتیجه گرفتند که بافت فوم یا اندازه حباب، عامل اصلی تأثیر گذار بر ویسکوزیته

کارایی مسدود کنندگی ضعیفی داشته و برای تولید فوم در حضور نفت مناسب نمی‌باشد [۱۴]. تحقیقات اندریانو و همکاران [۸] نشان داد که پایداری فوم وابسته به طول زنجیره کربن مولکول‌های نفت و سورفاکتانت است. نتایج ایشان نشان داد مخلوط سورفاکتانت‌های آوایس و افسی^۱ بهترین پایداری را در حضور نفت دارا می‌باشد. اما به دلیل مشکلات زیست محیطی استفاده از سورفاکتانت‌های افسی محدود شده است. در توافق با این نتایج، سیمجو و همکاران [۱۰] نیز گزارش داد کاهش طول زنجیره کربن آلکان‌ها، موجب کاهش پایداری فوم می‌شود.

لیومباس و همکاران [۴] اثر غلظت سورفاکتنت بر پایداری فوم را بررسی کردند. ایشان رابطه بین نسبت مایع فوم، حجم فوم و توزیع اندازه حباب‌های آن را با استفاده از تصاویر میکرو بررسی کردند. نتایج ایشان نشان داد افزایش پایداری فوم با غلظت سورفاکتانت رابطه خطی ندارد.

هرچند مطالعه پایداری فوم در مقیاس انباشته موجب بهبود شناخت فوم می‌گردد، اما جهت فهم کامل فیزیک پایداری فوم کافی نیست و می‌بایست مطالعات در هر دو مقیاس انباشته و حباب صورت گیرد. تاکنون تحقیقات ارزشمندی در جهت شناسایی جوانب مختلف دینامیک فوم در مقیاس حباب، صورت گرفته است [۱۵] و [۱۶]؛ اما تنها تحقیقات اندکی به بررسی و مقایسه پایداری فوم در هر دو مقیاس حباب و انباشته پرداخته‌اند. از جمله این تحقیقات، اسی‌بنسو و همکاران [۱۲] تأثیر خصوصیات فاز نفتی بر پایداری انواع فوم را در هر دو مقیاس انباشته و حباب تحقیق کردند. ایشان با تعریف طول نیمه‌عمر فوم در مقیاس حباب به عنوان معیار کمی نرخ درشت‌شدگی فوم، نتیجه گرفتند فوم با فیلم‌های ضخیم‌تر، تحمل بیشتری در حضور فاز نفتی نشان می‌دهد. در مطالعات رأفتی و همکاران [۱۷]، اثرات غلظت نمک و فاز نفتی بر پایداری فوم‌های آوایس و اس‌دی‌بی‌اس درون ستون عمودی در دما و فشار اتاق تحقیق شده است. با اندازه‌گیری طول نیمه‌عمر فوم، و توزیع اندازه حباب، آن‌ها کاهش پایداری فوم را با افزایش غلظت امولسیون نفت مشاهده کردند. به علاوه پایداری فوم به شدت به نوع ماده سورفاکتانت وابسته است، به طوری که در حضور ۲ درصد امولسیون نفت، طول نیمه‌عمر ثبت شده برای آوایس و اس‌دی‌بی‌اس به ترتیب ۱۰۷ و ۳۹ دقیقه ثبت

2 Pseudoemulsion

1 FC (Fluorocarbon)

جدول ۱. مشخصات سورفاکتانت‌های استفاده شده در آزمایشات

Table 1. Characteristics of the surfactants used in the experiments

نام تجاری	نام	کشش سطحی ($\text{mN} \cdot \text{m}^{-1}$)	ویسکوزیته ($\text{mPa} \cdot \text{s}$)	نوع	شرکت سازنده
اس دی اس	Sodium Dodecyl Sulfate	۳۴/۲۳	۱/۱۷۷	آنیونی	مرک
سی تب	Cetyl Trimethyl Ammonium Bromide	۳۷/۴۱	۱/۱۵۷	کاتیونی	مرک
آوا اس	Alpha Olefin Sulfonate	۳۶/۲۶	۱/۲۴۴	آنیونی	پی اس جی
سی ای پی پی	Cocamido Propyl Hydroxyl Sultaine	۳۴/۴۴	۱/۲۴۷	دوقطبی	پی اس جی
سی ای پی پی اس دی س	SDS 1:1 CAPB	۳۱/۷۱	۱/۱۸۲	-	-

جدول ۲. مشخصات مواد نفتی

Table 2. Specifications of the oils

نام	کشش سطحی ($\text{mN} \cdot \text{m}^{-1}$)	ویسکوزیته ($\text{mPa} \cdot \text{s}$)	چگالی (kg/m^3)	شرکت سازنده
دکان	۲۳/۱۹	۱/۰۴۳	۷۳۰	مرک
سیلیکونی آ	۱۹/۶۷	۴۷۲/۹	۹۵۰/۸۸	کی سی سی
سیلیکونی ب	۱۹/۸۵	۳۶۸/۹	۹۵۵/۴۴	کی سی سی
نفت خام	۲۲/۲۹	۱۳/۴۵	۸۴۰	میدان اسفند خلیج فارس

ظاهری جریان فوم درون منافذ کوچک است [۳].

علی‌رغم مطالعات پر شمار انجام شده بر پایداری فوم، رابطه بین نوع ماده سورفاکتانت و بافت فوم بر پایداری فوم به روشنی بیان نشده است، و شناسایی و انتخاب برترین سورفاکتانت در ساخت پایدارترین فوم میسر نیست. همچنین جهت کاربرد موفق فوم، شناسایی عوامل تأثیر گذار بر ویسکوزیته ظاهری آن از جمله کیفیت فوم، بافت فوم و نرخ جریان فوم ضروری به نظر می‌رسد. انگیزش اصلی این تحقیق، به واسطه اهمیت کاربرد فوم در بهبود بازیافت نفت ایجاد شده است. هدف این پژوهش، بررسی اثر نوع ماده سورفاکتانت و مشخصات عامل نفتی جهت معرفی پایدارترین فوم در هر دو مقیاس انباشته و حباب است. از دیگر اهداف این پژوهش، بررسی ویسکوزیته جریان فوم، به جهت جلوگیری از پدیده انگشتی شدن لزوج درون بستر متخلخل است. بستر ساخته شده برای آزمایشات مقیاس انباشته، ستون عمودی کروماتوگرافی مجهز به دیسک متخلخل است. با عبور هوا از محلول سورفاکتانت، فوم درون ستون ساخته می‌شود. پس از

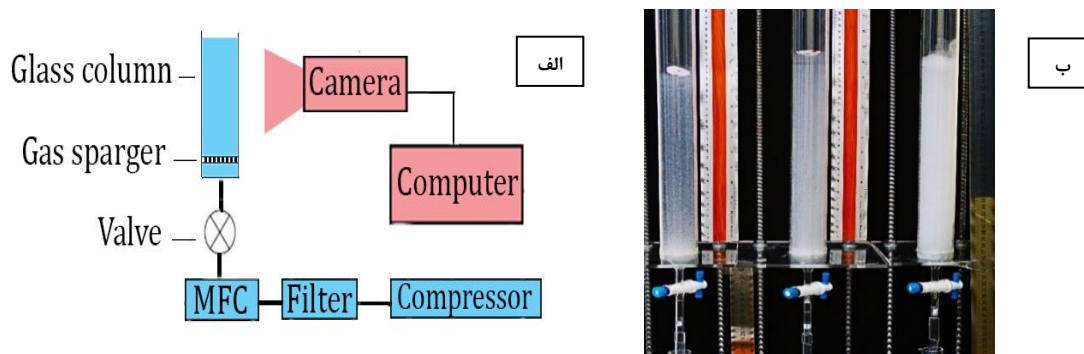
آن قادر خواهیم بود از طریق ثبت تصاویر سیر تحولات فوم را در ستون بررسی کنیم.

به علت پیچیدگی و محدودیت‌های بررسی جریان سیالات در محیط متخلخل، هندسه مورد استفاده در بستر مقیاس حباب، سلول هل‌شاو است. سلول هل‌شاو یک هندسه شبیه‌سازی شده از محیط متخلخل بوده که از دو صفحه موازی با فاصله بسیار کم ساخته می‌شود. معادله حاکم برای جریان خزشی سیال درون سلول هل‌شاو (رینولدز کم)، مشابه معادله دارسی درون بستر متخلخل است؛ با این تفاوت که با ساخت سلول شفاف و تصویربرداری از حباب‌های فوم قادر خواهیم بود تا سیر تحولات فوم را به صورت بصری بررسی کنیم.

۲- بستر آزمایشگاهی

۲-۱_ مواد استفاده شده

در ساخت محلول فوم‌ساز، از آب مقطر به عنوان سیال پایه و



شکل ۱. الف) طرح کلی ستاپ آزمایشگاهی ب) بستر آزمایشات مقیاس انباشته
Fig. 1. (a) The laboratory schematic and (b) the bulk scale experimental setup

دستگاه کنترل کننده جریان جرمی الیکت^۴ با مقدار ثابت و کنترل شده $100 \pm 0.1 \text{ cm}^3 / \text{min}$ به درون ستون توزیع می‌گردد. با رسیدن ارتفاع فوم به میزان مشخص ($50 \pm 0.5 \text{ cm}$ ستون)، تزریق هوا به ستون متوقف می‌شود. پس از تخلیه مایع درون ستون، ارتفاع ستون فوم در فواصل زمانی مشخص توسط دوربین کانن^۵ نصب شده در مقابل آن به صورت اتوماتیک ثبت می‌گردد. جهت اندازه‌گیری ارتفاع، بر روی هر یک از ستون‌ها، مقیاس اندازه‌گیری طولی مناسب نیز نصب شده است.

۲-۳_بستر آزمایشات مقیاس حباب

در شکل ۲ بستر طراحی شده و ساخته شده آزمایشات مقیاس حباب نشان داده شده است. سلول هل شاو، از دو صفحه پلکسی شیشه‌ای شفاف با طول ۶۰ cm، عرض ۶۰ cm و ضخامت ۱۰ mm ساخته شده است. جهت ایجاد فاصله بین دو صفحه و همچنین آب‌بندی سلول، از گسکت کاغذی نسوز غیرقابل فشرده شدن با ضخامت $0.1 \pm 0.05 \text{ mm}$ استفاده شده است. جهت ورود و خروج یکنواخت جریان سیال، در ورودی و خروجی سلول، گسکت به شکل V برش خورده است.

برای اندازه‌گیری فشار ورودی و خروجی و محاسبه افت فشار در طول سلول، سلول ساخته شده مجهز به دو سنسور فشار از نوع ترنسمیتر با دقت ۰/۵ درصد ساخت شرکت ویکا^۶ است. جهت ساخت فوم، یک ستون کروماتوگرافی مخصوص با قطر داخلی ۴ cm و طول ۱۰ cm، طراحی و ساخته شده است. در مسیر ورودی هوا به فوم‌ساز،

چهار سورفاکتانت با ۰/۵ درصد وزنی، جهت ساخت فوم استفاده شده است. سورفاکتانت پنجم (سی‌ای‌پی‌بی‌اس‌دی‌اس^۱) از ترکیب سورفاکتانت‌های اس‌دی‌اس و سی‌ای‌پی‌بی^۲ با نسبت ۱:۱ ساخته شده است. در جدول ۱ سورفاکتانت‌های استفاده شده به همراه مشخصات آن‌ها آورده شده است. تمام اندازه‌گیری‌های وزنی با استفاده از ترازوی شرکت رادواگ^۳ و با دقت ۰/۰۰۱ گرم انجام شده است. در آزمایشات بررسی پایداری فوم در حضور فاز نفتی، از چهار ماده نفتی متفاوت استفاده شده است. در جدول ۲ مشخصات مواد نفتی مورد استفاده در این تحقیق ارائه شده است. لازم به ذکر است که تمامی آزمایشات انجام شده در شرایط آزمایشگاه (دمای اتاق ۲۵ درجه سانتی‌گراد و فشار اتمسفر) انجام شده است.

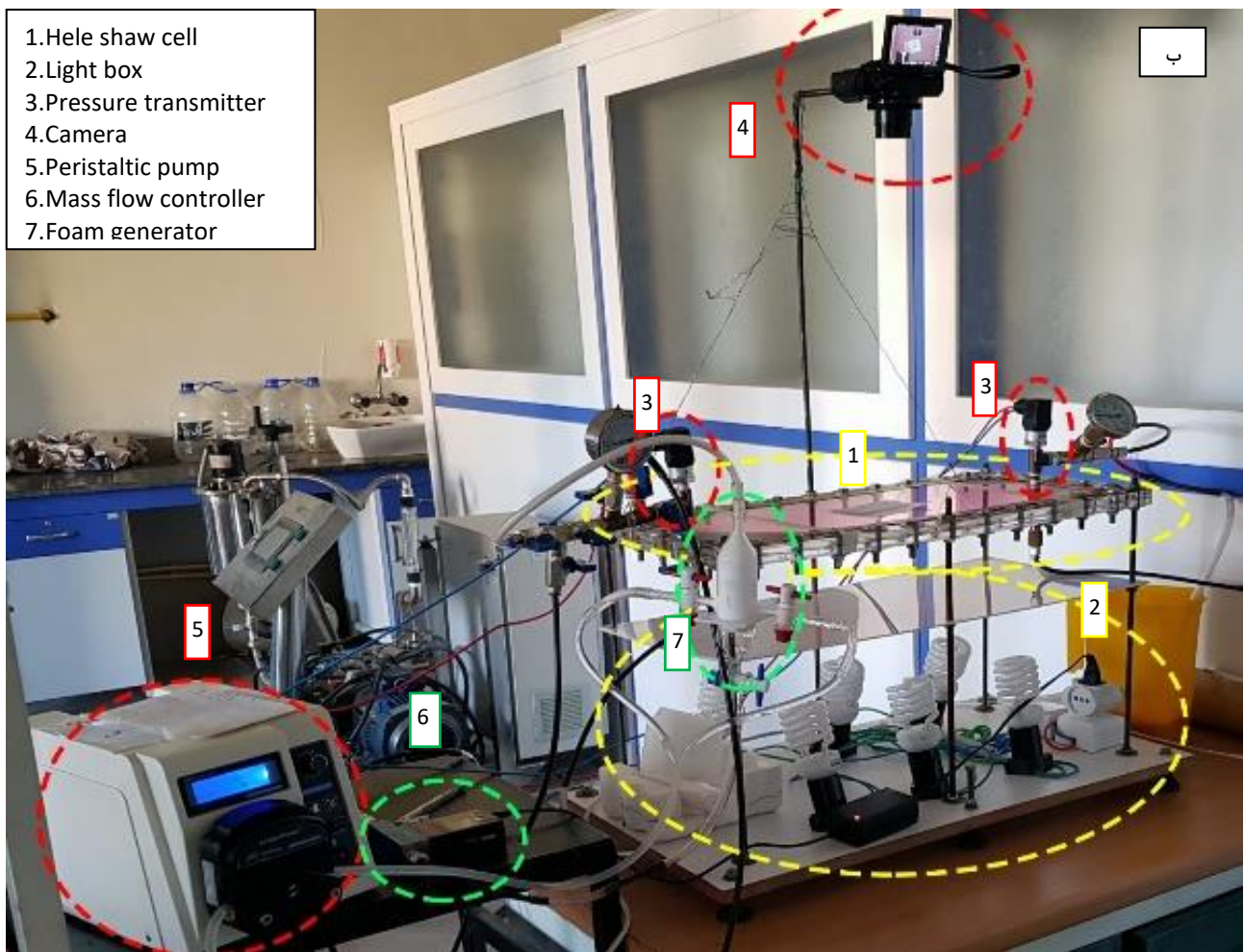
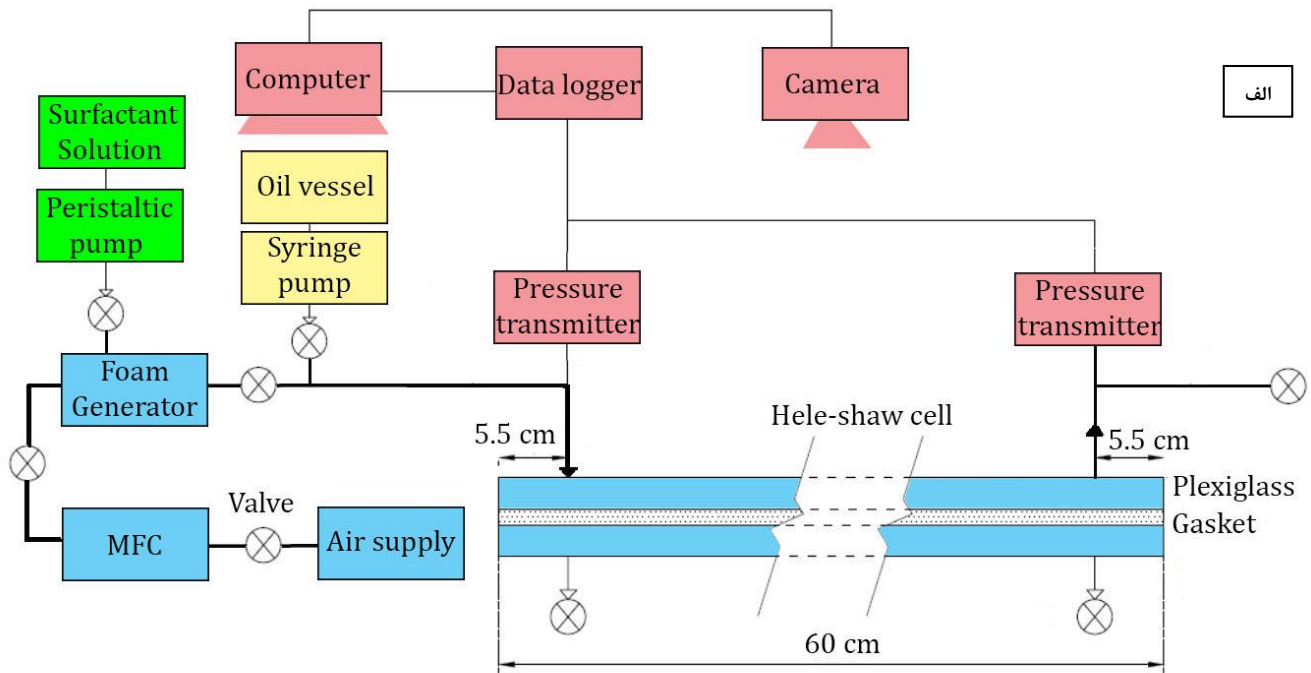
۲-۲_بستر آزمایشات مقیاس انباشته

در شکل ۱ طرح کلی بستر آزمایشگاهی مقیاس انباشته و بستر ساخته شده آن نشان داده شده است.

سه ستون شیشه‌ای مورد استفاده در این تحقیق (شکل ۱ ب) دارای قطر داخلی ۴ cm و ارتفاع ۵۰ cm می‌باشند. هر یک از این ستون‌ها، مجهز به یک دیسک متخلخل هستند که در کف ستون قرار گرفته است و نقش توزیع کننده گاز ورودی به داخل ستون را بر عهده دارد. با قرار گیری $30 \pm 0.1 \text{ ml}$ محلول فوم‌ساز درون ستون و توزیع هوا به درون آن، فوم درون ستون ساخته می‌شود. در این فرآیند، هوای کمپرسور پس از عبور از فیلتر ۱۰ میکرونی، از طریق

4 Alicat (MC100)
 5 Canon (G7X mark2)
 6 Wika (A10)

1 CAPBSDS
 2 CAPB (Cocamido Propyl Hydroxyl Sultaine)
 3 Radwag



شکل ۲. الف) بستر طراحی شده و ب) بستر ساخته شده آزمایشات مقیاس حباب
 Fig. 2. (a) The laboratory schematic and (b) the bubble scale experimental setup

جزئیات، در زیر سلول، یک جعبه نوری ثابت و متصل به سلول ساخته شده است.

۴-۲_پردازش تصویر

در تحقیق حاضر تحلیل و پردازش تصاویر آزمایشات مقیاس حباب به کمک نرم‌افزار متلب انجام شده است. با استفاده از دستوره‌های متلب، تصاویر رنگی به تصاویر باینری تبدیل می‌شود. آرایه‌های ماتریس متناظر با تصاویر باینری، تنها متشکل از مقادیر صفر و یک هستند، و پردازش تصویر با انجام محاسبات بر روی آن‌ها صورت می‌گیرد. دقت تصاویر ثبت شده توسط دوربین pixel/mm ۳۳/۷۷ است.

۳- نتایج

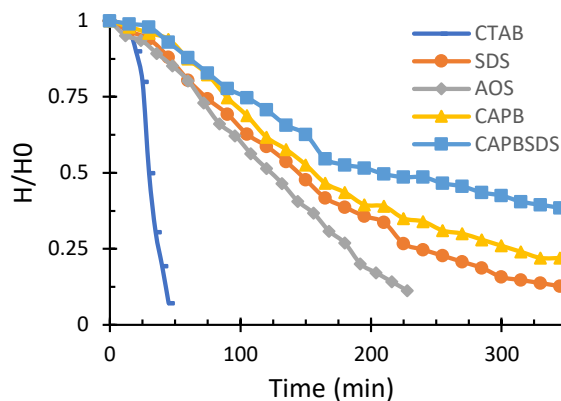
۳-۱_آزمایشات مقیاس انباشته

۳-۱-۱_آزمایشات پایداری فوم در غیاب فاز نفتی

پس از این که ستون تا ارتفاع ۵۰ cm از فوم پر شد، توزیع هوا به درون آن متوقف می‌گردد. سپس کاهش ارتفاع فوم در طی زمان از طریق تصویربرداری خودکار، ثبت گشته است. بایستی در نظر داشت که دو طرف ستون‌ها در حین انجام آزمایشات باز است (ستون‌ها هوابند نیستند). شکل ۳ پروفایل کاهش ارتفاع بی‌بعد شده فوم‌ها با سورفاکتانت‌های مختلف را در طول زمان نشان می‌دهد.

با توجه به شکل ۳، به دلیل سیستم ناپایدار ترمودینامیکی ارتفاع تمامی فوم‌ها با گذشت زمان کاهش یافته است. در آزمایشات مقیاس انباشته در غیاب فاز نفتی، بیشترین پایداری را فوم سی‌ای‌پی‌بی‌اس‌دی‌اس از خود نشان داده است. نتایج نشان می‌دهد که این فوم پس از گذشت ۲۰۰ دقیقه از شروع آزمایش، در حدود ۵۰ درصد از ارتفاع اولیه خود را همچنان دارا است. پس از آن بیشترین پایداری به فوم‌های سی‌ای‌پی‌بی، اس‌دی‌اس و آو‌اس تعلق دارد. کمترین پایداری نیز مربوط به فوم سی‌تب می‌باشد؛ به طوری که در مدت زمان کمتر از ۵۰ دقیقه به طور کامل نابود شده است.

فوم‌های آنیونی اس‌دی‌اس و آو‌اس با ثبت زمان تقریبی ۱۴۰ دقیقه‌ای طول عمر متوسطی را در غیاب فاز نفتی ثبت کرده‌اند. بافت این فوم‌ها بسیار ریز است و نرخ درشت‌شدگی آن‌ها کمتر از دیگر فوم‌ها است؛ به طوری که با توقف توزیع هوا به محلول سورفاکتانت،



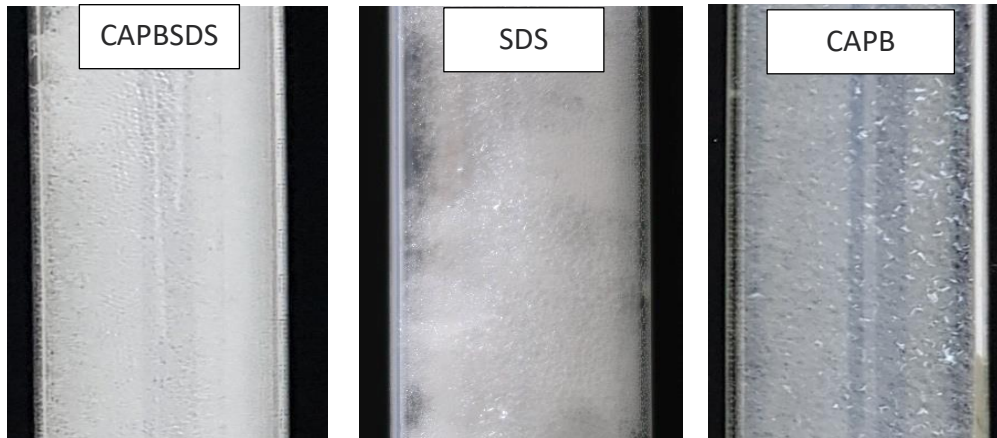
شکل ۳. پروفایل کاهش ارتفاع بی‌بعد انواع مختلف فوم در طول زمان آزمایش

Fig. 3. The dimensionless height reduction profile of different types of foam over the test time

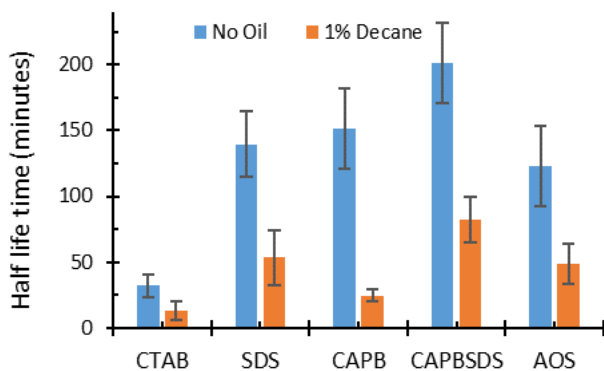
یک دیسک متخلخل نصب شده است تا هوا را به صورت یکنواخت به محلول فوم‌ساز توزیع کند. در این فرآیند، هوای کمپرسور پس از عبور از فیلتر ۱۰ میکرونی، از طریق دستگاه کنترل‌کننده جریان جرمی با مقدار ثابت و کنترل شده به درون فوم‌ساز توزیع می‌گردد. به طور هم‌زمان، با استفاده از پمپ پرستالتیک لانگر^۱ محلول سورفاکتانت با دبی ثابت از مسیرهای مخصوص، به فوم‌ساز وارد می‌گردد. سپس فوم خارج شده از فوم‌ساز، از مسیرهای ارتباطی به قطر داخلی ۴ mm، به سلول هل‌شاو وارد می‌شود. طول مسیر ارتباطی از فوم‌ساز تا سلول تا حد امکان کوتاه در نظر گرفته شده است تا کمترین اثرگذاری را در حباب‌ها داشته باشد. در آزمایشات با حضور فاز نفتی، هم‌زمان با تزریق فوم، عامل نفتی از طریق پمپ سورنگی جی‌ام‌اس^۲ با نرخ ثابت $1 \pm 0.15 \text{ ml/min}$ به سلول، فشار ورودی و خروجی آن با استفاده از سنسورهای فشار به صورت لحظه‌ای ثبت می‌گردد. با پایدار شدن جریان، شرایط فوم و حباب‌ها، مسیر ورودی سیال به سلول بسته می‌گردد. جهت پایدار کردن اینرسی حرکتی فوم، مسیر دیگر ورودی به سلول در این زمان باز می‌گردد. با گذشت زمانی کوتاه، فوم کاملاً به تعادل رسیده و از حرکت باز می‌ایستد. از آن پس با تصویربرداری از طریق دوربین نصب شده بر بالای سلول، سیر تحولات فوم در فواصل زمانی مشخص، ثبت می‌گردد. دوربین فوق‌قادر خواهد بود تصاویری با رزولوشن 3648×5472 پیکسل ثبت کند. جهت افزایش کیفیت تصاویر و ثبت بهتر

1 Longer (BT100-IF)

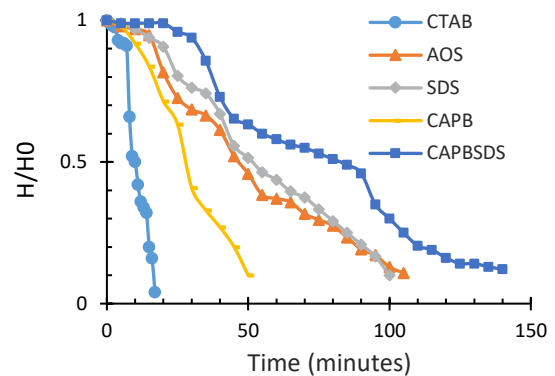
2 JMS (SP-500)



شکل ۴. وضعیت ظاهری فوم‌های مختلف پس از مدت زمان ۴۰ دقیقه از شروع آزمایش
 Fig. 4. The appearance of different foams after 40 minutes



شکل ۶. طول نیمه‌عمر فوم‌های مختلف
 Fig. 6. The half-life of different foams



شکل ۵. روفایل نابودی فوم‌های مختلف در حضور ۱ درصد وزنی دکان
 Fig. 5. The destruction profile of different foams in the presence of 1wt% Decane

و این امر در نهایت پارگی لاملایی و نابودی فوم را در پی خواهد داشت. علی‌رغم این‌که تخلیه مایع از فیلم‌های لاملایی پدیده حاکم در فاز اولیه پایداری فوم است، اما رابطه مشخصی بین تخلیه مایع فوم و پایداری کلی آن وجود ندارد. به عبارت دیگر ممکن است یک فوم متحمل تخلیه مایع سریع شود، اما همچنان پایدار باقی بماند. در شکل ۴ وضعیت ظاهری فوم‌های مختلف پس از گذشت مدت زمان ۴۰ دقیقه از شروع آزمایشات نشان داده شده است.

بر اساس شدت تراکم فوم‌ها که معرف حضور بیشتر فاز مایع درون فوم است، مشاهده می‌شود فوم سی‌ای‌پی‌بی نسبت به فوم اس‌دی‌اس خشک‌تر است، زیرا در طی مراحل اولیه نابودی، تخلیه مایع از فیلم‌های پلاتیو و لاملایی آن، بسیار سریع صورت می‌گیرد. اما با وجود خشکی حباب‌های سی‌ای‌پی‌بی، نابودی آن‌ها به دلیل پایداری

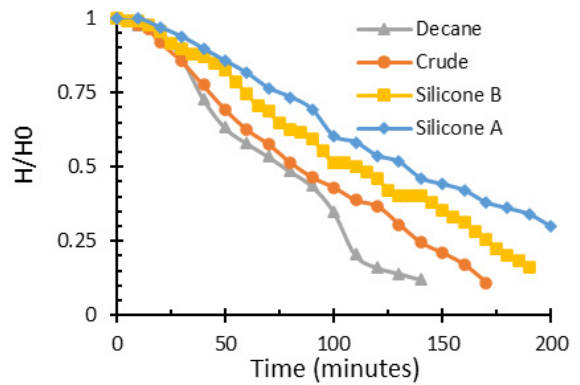
حباب‌های فوم‌های اس‌دی‌اس و آواس متحمل یک نابودی یکنواخت شده و به دنبال آن ارتفاع آن‌ها با شیب یکسانی کاهش می‌یابد. اما علی‌رغم درشت‌شدگی حباب‌های فوم سی‌ای‌پی‌بی با گذشت زمان، این فوم به همراه فوم سی‌ای‌پی‌بی‌اس‌دی‌اس برای مدت زمان طولانی پایدار هستند و به مرور فیلم‌های لاملایی آن‌ها آنقدر نازک می‌شوند که تقریباً ناپیدا می‌گردند.

با وجود این‌که در بعضی تحقیقات، منحنی کاهش ارتفاع فوم در طول زمان به عنوان معیار پایداری فوم معرفی شده است، اما ممکن است به تنهایی تصویر کاملی از سیر تحولات فوم ارائه نکنند. نرخ نابودی ارتفاع فوم با پایداری فیلم‌های نازک لاملایی رابطه دارد. از عوامل تأثیرگذار بر پایداری فیلم‌های لاملایی، تخلیه مایع از آن‌ها است. به‌طور کلی، تخلیه آهسته مایع از لاملایی، منجر به نازک شدن آن‌ها می‌شود

در مقیاس انباشته تحقیق شده است. جهت این امر، پس از تشکیل ستون فوم، با استفاده از سورنگ‌های مخصوص مقدار ۱ درصد وزنی دکان به آرامی بر روی سطح بالایی فوم تزریق شده است. در شکل ۵، پروفایل نابودی فوم برای سورفاکتانت‌های مختلف نشان داده شده است. مقایسه روند کاهش پروفایل فوم در حضور و عدم حضور فاز نفتی (شکل‌های ۳ و ۵)، تأییدکننده اثر ناپایدارکننده فاز نفتی بر پایداری فوم است. این نتیجه منطبق با نتایج مطالعات محققان پیشین است [۸، ۱۰، ۱۲، ۱۹].

معیار اصلی در آزمایشات مقیاس انباشته، طول نیمه‌عمر (یعنی مدت زمان سپری شده تا کاهش ارتفاع فوم به نصف میزان اولیه) بوده که به عنوان معیاری کمی جهت مقایسه و بررسی پایداری فوم استفاده شده است. طول نیمه‌عمر بیشتر، نشان‌دهنده پایداری بیشتر فوم خواهد بود و بالعکس. این معیار تاکنون در پژوهش‌های پیش از این نیز استفاده شده است [۱۰، ۱۲، ۱۹، ۲۳]. در شکل ۶ طول نیمه‌عمر فوم‌های مختلف در حضور و عدم حضور دکان با یکدیگر مقایسه شده است.

بر طبق شکل ۶، اثر ناپایدارکننده فاز نفتی دکان و کاهش طول نیمه‌عمر فوم برای تمام سورفاکتانت‌های استفاده شده در این مطالعه مشهود است. با مرتبه‌بندی پایداری فوم‌های مختلف در حضور دکان، سی‌تب کمترین پایداری و سی‌ای‌پی‌بی‌اس‌دی‌اس بیشترین پایداری را ثبت کرده است. بیشترین تأثیر حضور دکان بر روی فوم سی‌ای‌پی‌بی‌بی مشاهده می‌شود، به طوری که طول نیمه‌عمر آن در حضور دکان ۸۴ درصد کاهش داشته است. زیرا تخلیه سریع مایع از فیلم‌های فوم سی‌ای‌پی‌بی، موجب نازک شدن لاملایی‌ها و کاهش مقاومت آن‌ها در مقابل پخش فاز نفتی می‌شود. پخش دکان، موجب اختلال در چیدمان و ترتیب مولکول‌های سورفاکتانت در سطح مشترک گاز-مایع شده، الاستیسیته و لزجت سطح فوم را تغییر می‌دهد. با تغییر مشخصات سطوح لاملایی، مولکول‌های سورفاکتانت از سطح مشترک گاز-مایع تخلیه شده و پایداری فوم کاهش می‌یابد. نتایج شکل‌های ۳ تا ۶ اثبات‌کننده اثر نوع ماده سورفاکتانت بر پایداری فوم است. به جهت دارا بودن بیشترین پایداری در حضور و عدم حضور دکان، فوم سی‌ای‌پی‌بی‌اس‌دی‌اس برای آزمایشات پیش‌رو در مقیاس انباشته انتخاب شده است.



شکل ۷. پروفایل نابودی فوم سی‌ای‌پی‌بی‌اس‌دی‌اس در حضور انواع مختلف فاز نفتی

Fig. 7. The CAPBSDS destruction profile in the presence of different types of oil phase

فیلم‌های لاملایی رخ نمی‌دهد. همچنین فشار مویبینگی بحرانی بالاتر فوم سی‌ای‌پی‌بی در مقایسه با فوم‌های اس‌دی‌اس و آواس (که متناظر با ضخامت بحرانی کمتر فیلم آن پیش از پارگی است)، موجب پایداری بیشتر حباب‌های آن حتی پس از تخلیه سریع مایع می‌شود. از طرف دیگر، کاهش ارتفاع فوم اس‌دی‌اس با وجود تخلیه مایع کمتر (و مشابه آن فوم آواس)، بیان‌کننده ناپایداری حباب‌ها و نابودی آن‌ها حتی در اولین دقایق آزمایشات است. به‌طور خلاصه، خصوصیات فیزیکی شیمیایی سورفاکتانت از جمله ویسکوزیته محلول آن، بر تخلیه مایع از فوم و همچنین مقاومت فوم به فشار مکش مویبینگی و در نتیجه بر پایداری و نابودی حباب‌ها تأثیرگذار است. این نتایج توافق خوبی با نتایج مشاهده شده در مرجع [۱۲] دارد.

نتایج این بخش نشان می‌دهد که بررسی پایداری فوم در مقیاس انباشته، دربردارنده تمامی پارامترهای تأثیرگذار بر پایداری فوم نبوده، و به تنهایی روش کاملی نیست؛ زیرا همانطور که در مورد فوم سی‌ای‌پی‌بی بیان شد، ممکن است علی‌رغم خشکی زیاد حباب‌ها، ارتفاع فوم پایدار بماند. بایستی توجه داشت که در عمل و در حین جابجایی فوم در بستر متخلخل، خشکی بیش از حد فوم ممکن است بر پایداری و کارایی آن در حضور ارتعاشات مکانیکی اثر گذار باشد. از این‌رو نیاز است تا پایداری فوم علاوه بر مقیاس انباشته، در مقیاس حبابی نیز مورد مطالعه و بررسی قرار گیرد.

۳-۱-۲- آزمایشات پایداری فوم در حضور فاز نفتی

در این قسمت از آزمایشات، پایداری فوم در تماس با فاز نفتی

لایه‌بندی فیلم‌ها شده و نهایتاً موجب کاهش پایداری فوم می‌شود [۲۵].

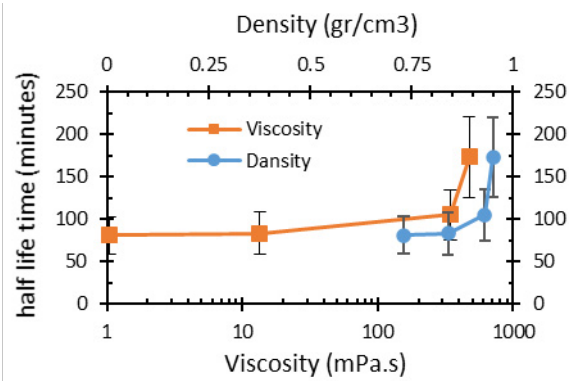
کاهش لزجت فاز نفتی نیز موجب تسهیل پخش قطرات نفت درون فوم می‌شود. پخش بیشتر قطرات نفت در فوم، افزایش تماس نفت و شبکه فوم را به همراه دارد که در نهایت موجب کاهش پایداری فوم می‌گردد. گرایش مشاهده شده در آزمایشات ما نیز ممکن است به این پدیده‌ها نسبت داده شود. بایستی توجه شود که آزمایشات پایداری فوم سی‌ای‌پی‌بی‌اس‌دی‌اس جهت کسب اطمینان، چندین بار تکرار شده است.

۳-۲-۲ پایداری فوم در مقیاس حباب

۳-۲-۱-۱ پایداری فوم در غیاب فاز نفتی، مقیاس حباب

در این بخش درشت‌شدگی و پارگی حباب‌ها که به همراه تخلیه مایع از فیلم‌های لاملائی، بر پایداری فوم اثر می‌گذارد بررسی شده‌اند. فوم با تزریق هوا با دبی حجمی $100 \pm 0.1 \text{ cm}^3/\text{min}$ در کیفیت ۹۵ درصد توسط فوم‌ساز ساخته شده و به درون سلول وارد شده است. شکل ۹ به صورت کیفی نشان‌دهنده وضعیت فوم‌های مختلف درون سلول هل‌شاو در زمان‌های مختلف از شروع آزمایشات است.

در آزمایشات دوبعدی درون سلول هل‌شاو، به دلیل قرارگیری سلول به صورت کاملاً افقی، و همچنین فاصله بسیار کم 0.5 mm بین صفحات شفاف، اثر گرانش در تخلیه مایع از فیلم‌های فوم قابل چشم‌پوشی است. در این شرایط درشت‌شدگی فوم که در نتیجه انعقاد حباب‌ها و یا پخش گاز است، سهم غالب را در تخریب فوم ایفا می‌کند. با مقایسه کیفی فوم‌ها در زمان شروع آزمایش، درشت‌ترین حباب‌ها متعلق به فوم سی‌تب و ریزترین بافت فوم اختصاص به اس‌دی‌اس و سی‌ای‌پی‌بی‌اس‌دی‌اس دارد. با مقایسه تصاویر ابتدایی و انتهایی، فوم سی‌تب بیشترین نرخ درشت‌شدگی را نشان می‌دهد. در مورد فوم آ‌واس علاوه بر نرخ درشت‌شدگی، پارگی گسترده فیلم‌های لاملائی نیز مشاهده می‌شود. به دلیل کمترین نرخ درشت‌شدگی، بیشترین پایداری به فوم‌های سی‌ای‌پی‌بی‌اس‌دی‌اس و سی‌ای‌پی‌بی‌اس‌دی‌اس اختصاص دارد. از جمله موارد تأثیرگذار بر پایداری فوم‌ها، ضخامت فیلم‌های لاملائی است، به طوری که هرچه ضخامت لاملائی‌ها بیشتر باشد، فشار موئینگی بحرانی فیلم‌های فوم افزایش می‌یابد [۲۶]. همانطور که مشاهده می‌شود ضخامت لاملائی‌های فوم‌های سی‌تب و آ‌واس در



شکل ۸. اثر مشخصات فاز نفتی (ویسکوزیته و چگالی) بر طول نیمه‌عمر فوم سی‌ای‌پی‌بی‌اس‌دی‌اس

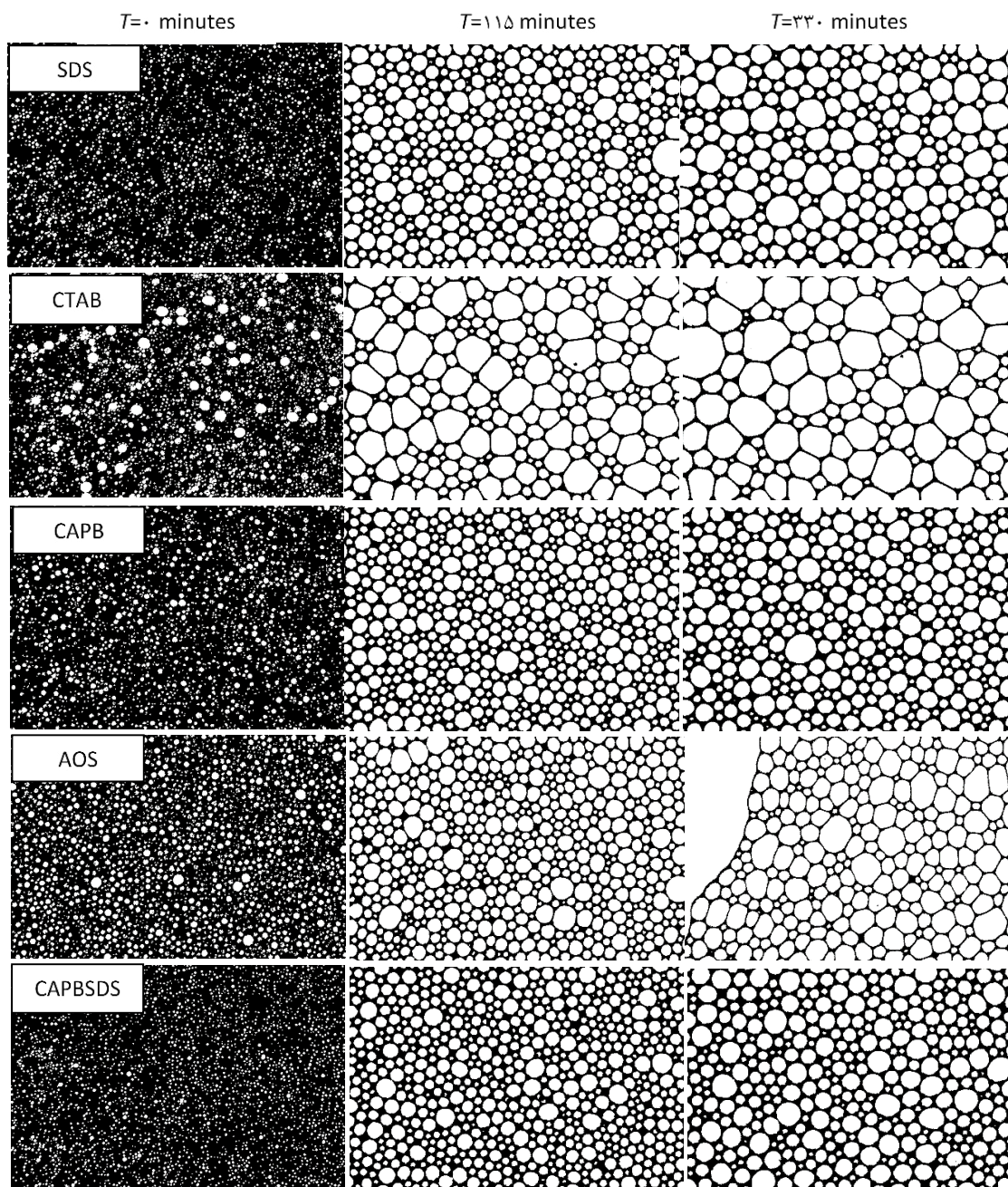
Fig. 8. The Effect of oil phase characteristics (viscosity and density) on the foam half-life of CAPBSDS

۳-۱-۳ اثر انواع مختلف فاز نفتی بر پایداری فوم

در این بخش پایداری فوم سی‌ای‌پی‌بی‌اس‌دی‌اس در حضور انواع مختلف فاز نفتی تحقیق شده است. شکل ۷ پروفایل نابودی ارتفاع این فوم را در حضور چهار عامل نفتی متفاوت نشان می‌دهد.

نتایج شکل ۷ نشان می‌دهد، تغییر مشخصات فاز نفتی تأثیر قابل توجهی بر میزان پایداری فوم دارد. جهت شناسایی و تمایز خصوصیات تأثیرگذار فاز نفتی بر پایداری فوم، در شکل ۸ طول نیمه‌عمر فوم بر مبنای مشخصات فاز نفتی (ویسکوزیته و چگالی) ترسیم شده است. همانطور که در شکل ۸ مشاهده می‌گردد، طول نیمه‌عمر فوم سی‌ای‌پی‌بی‌اس‌دی‌اس با افزایش ویسکوزیته و چگالی فاز نفتی افزایش می‌یابد. این امر با نتایج استخراج شده از مطالعات دیگر محققین تطابق دارد [۸، ۱۰، ۱۲، ۱۹]. بر طبق شکل‌های ۷ و ۸، فاز نفتی دکان با دارا بودن کمترین چگالی و ویسکوزیته، بیشترین اثرات ناپایدارکننده را بر فوم ایجاد کرده است. همچنین نتایج نشان می‌دهد بیشترین پایداری این فوم، در حضور فاز نفتی سیلیکون آ است. به‌طور کلی هیدروکربن‌ها با طول زنجیره کربن کوتاه‌تر به دلیل داشتن ساختمان مولکولی کوچک‌تر، قابلیت حل‌پذیری بیشتری به درون میسل‌های متراکم دارند. این حل‌پذیری بیشتر، موجب تشدید اثرات مخرب فاز نفتی بر پایداری فوم می‌شود.

نتایج تحقیقات نشان داده است که حل‌پذیری فاز نفتی در میسل‌ها موجب افزایش نیروهای وان در والس بین میسل‌ها می‌شود [۲۴]. این امر منجر به کاهش غلظت حجمی میسلرها و سرکوب



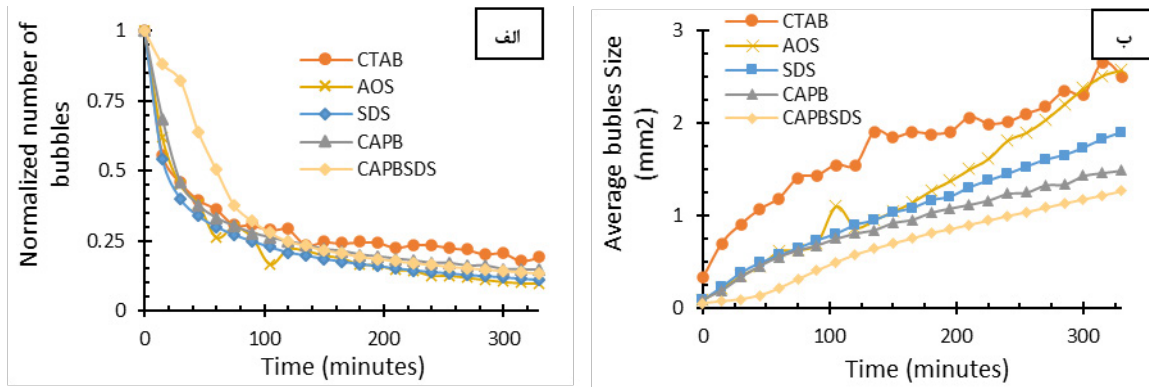
شکل ۹. وضعیت کیفی فوم‌های مختلف در زمان شروع، دقیقه ۱۱۵ و دقیقه ۳۳۰

Fig. 9. The qualitative status of different foams at start time, 115 minutes and 330 minutes

حباب‌های فوم‌های تر به شکل کروی هستند. به همین دلیل فوم‌های اس‌دی‌اس، سی‌ای‌پی‌پی و سی‌ای‌پی‌بی‌اس‌دی‌اس با حفظ درصد بالایی از مایع خود در طول زمان، همچنان دارای حباب‌هایی با شکل دایروی هستند؛ اما حباب‌های فوم‌های سی‌تب و آواس به دلیل تخلیه مایع بیشتر از مرزهای لاملایی، با گذشت زمان اشکال چند ضلعی به خود گرفته‌اند. نتایج این قسمت توافق خوبی با پژوهش‌های دیگر

مقابل باقی فوم‌ها کمتر بوده که می‌تواند موجب کاهش فشار موئینگی بحرانی لاملایی‌ها و دلیلی بر درشت‌شدگی بیشتر آن‌ها در مقایسه با دیگر فوم‌ها باشد.

از دیگر تفاوت‌های فوم‌های آزمایش، شکل ظاهری حباب‌های آن می‌باشد. به‌طور کلی فوم‌های خشک (یا به عبارتی فوم با درصد مایع کمتر) از حباب‌های چند ضلعی تشکیل می‌شوند، حال آن‌که



شکل ۱۰. الف) تعداد حباب‌های اصلاح شده انواع فوم در طول زمان (ب) میانگین اندازه حباب‌های انواع فوم در طول زمان

Fig. 10. (a) The normalized number and (b) The average size of foam bubbles over time

۲۵ درصد از تعداد اولیه خود (گذشت حدود ۱۰۰ دقیقه از ابتدای آزمایشات) نرخ درشت‌شدگی تمامی فوم‌ها تقریباً یکسان می‌گردد. با توجه به شکل ۱۰ الف می‌توان نرخ کاهش تعداد حباب‌ها را به دو بخش کلی تقسیم کرد. در بخش اول (ابتدای آزمایشات) نرخ نابودی و انعقاد حباب‌ها بالا بوده و تعداد آن‌ها با شیب بسیار بالایی کاهش می‌یابد. اما پس از عبور از این مرحله، در قسمت نابودی ثانویه، حباب‌های فوم، به یک پایداری نسبی رسیده و نرخ کاهش تعداد آن‌ها با سرعت کمتری ادامه یافته است.

بر طبق شکل ۱۰ ب، اندازه میانگین حباب‌های فوم‌های مختلف با گذشت زمان افزایش یافته است. بزرگترین اندازه حباب‌ها در هر زمان به فوم سی‌تی‌بی (درشت‌ترین بافت فوم) و کوچکترین اندازه حباب‌ها به فوم سی‌ای‌پی‌بی‌اس‌دی‌اس (ریزترین بافت فوم) اختصاص دارد. در این شکل میانگین اندازه حباب‌های فوم آو‌اس در ابتدا مشابه فوم‌های اس‌دی‌اس و سی‌ای‌پی‌بی‌اس‌دی‌اس است؛ اما از حدود دقیقه ۱۵۰، میانگین اندازه حباب‌های فوم آو‌اس از دو فوم دیگر فاصله گرفته که می‌تواند نشان‌دهنده ایجاد پارگی فیلم‌های فوم و انعقاد حباب‌های آن باشد (شکل ۹). میانگین اندازه حباب فوم‌های سی‌ای‌پی‌بی‌اس‌دی‌اس، سی‌ای‌پی‌بی‌اس‌دی‌اس، آو‌اس و سی‌تی‌بی پس از گذشت ۳۰۰ دقیقه به ترتیب 1.17 ، 1.43 ، 1.73 ، 2.30 ، 2.37 mm^2 است.

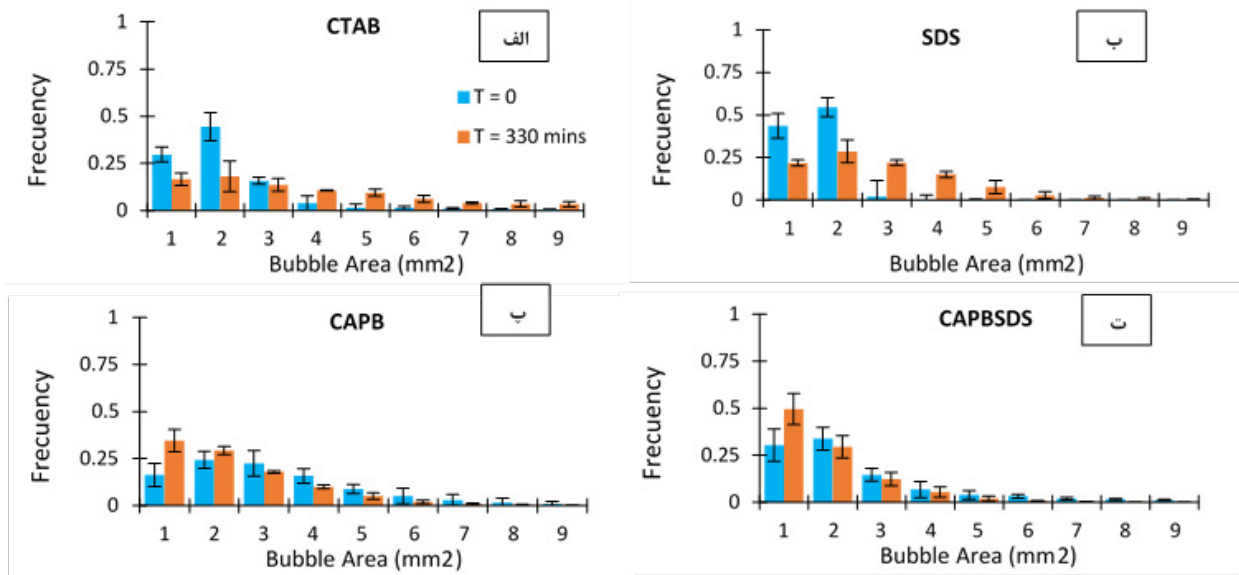
به‌طور کلی از تصاویر این قسمت (شکل‌های ۹ و ۱۰) می‌توان نتیجه گرفت که حباب‌های تمامی فوم‌ها، در طی آزمایش درشت شده‌اند. کمترین درشت‌شدگی حباب به فوم سی‌ای‌پی‌بی‌اس‌دی‌اس اختصاص دارد. این امر به دلیل پایداری بالای فوم سی‌ای‌پی‌بی‌اس‌دی‌اس بوده

محققین دارد [۱۲].

برای کمی کردن دینامیک و شناسایی فوم در مقیاس حباب، نیاز به معرفی پارامترهای جدیدی است تا با استفاده از آن بتوان پایداری فوم‌های مختلف را مقایسه کرد. لذا با استفاده از پردازش تصاویر ثبت شده برای هر فوم در طول زمان، تعداد حباب و متوسط اندازه حباب‌ها محاسبه شده است. در آنالیز تصاویر، حداقل اندازه حباب 0.2 cm^2 در نظر گرفته شده است. به عبارت دیگر به شکل‌های بسته با اندازه‌ای کوچکتر از این مقدار توجهی نمی‌شود. در شکل ۱۰ الف تعداد حباب‌های اصلاح شده (تعداد حباب تقسیم بر تعداد حباب در زمان شروع آزمایش) و در شکل ۱۰ ب میانگین اندازه حباب برای فوم‌های مختلف در طول زمان ترسیم شده است.

همانطور که در شکل ۱۰ الف مشاهده می‌شود، تعداد حباب‌های تمامی فوم‌ها در طول زمان کاهش یافته است که بیانگر نابودی حباب‌ها و انعقاد آن‌ها با یکدیگر (درشت‌شدگی فوم‌ها) می‌باشد. با توجه به شیب نمودار (شکل ۱۰ الف)، نرخ کاهش تعداد حباب‌های تمامی فوم‌ها در ابتدای آزمایشات بسیار بالا است، اما با گذشت زمان، شیب آن کاهش یافته که نشان‌دهنده پایداری نسبی حباب‌ها است. در دقایق ابتدایی آزمایشات، فوم سی‌ای‌پی‌بی‌اس‌دی‌اس کمترین نرخ درشت‌شدگی و تخریب حباب را در بین دیگر فوم‌ها دارا می‌باشد. برای مثال پس از گذشت ۵۰ دقیقه از شروع آزمایشات، تنها ۴۰ درصد از تعداد حباب‌های فوم سی‌ای‌پی‌بی‌اس‌دی‌اس کاسته شده است؛ در حالی که این عدد برای دیگر فوم‌ها در حدود ۶۵ درصد می‌باشد.

بر طبق شکل ۱۰ الف، با کاهش تعداد حباب‌های هر فوم به حدود



شکل ۱۱. توزیع اندازه حباب‌های فوم‌های مختلف در زمان‌های صفر و ۳۳۰ دقیقه
Fig. 11. The bubble size distribution of different foams at 0 and 330 minutes

فوم سی‌ای‌پی‌بی‌اس‌دی‌اس همچنان در همان بازه اندازه اولیه حضور دارند.

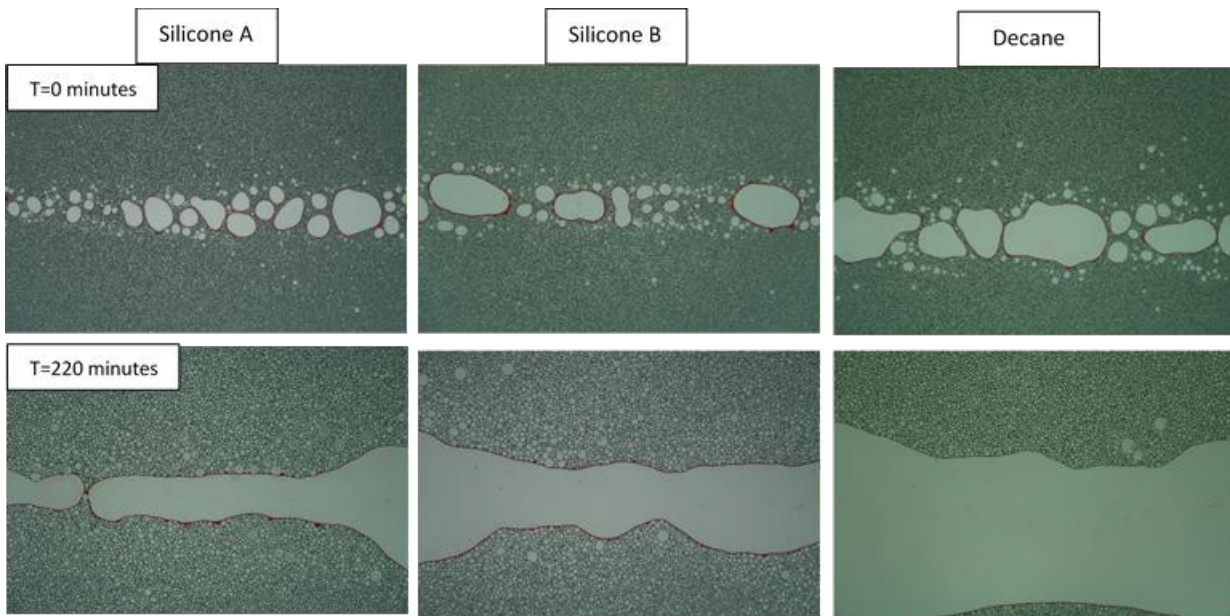
۳-۲-۲ پایداری فوم در حضور فاز نفتی، نتایج مقیاس حباب با استفاده از بستر آزمایشگاهی نشان داده شده در شکل ۲، در این قسمت رفتار فوم در حضور فازهای مختلف نفتی در مقیاس حباب تحقیق شده است. در آزمایشات این قسمت، فاز نفتی با دبی ml/hr ۱۵ توسط پمپ سورنگی به صورت هم‌زمان با فوم، به درون سلول تزریق شده است. این عمل تا پر شدن تمامی سلول و رسیدن به شرایط جریانی پایا ادامه می‌یابد. ما فوم سی‌ای‌پی‌بی‌اس‌دی‌اس که بیشترین پایداری را در آزمایشات قبلی از خود نشان داده است، برای انجام آزمایشات این قسمت انتخاب کرده‌ایم. در شکل ۱۲ وضعیت کیفی فوم سی‌ای‌پی‌بی‌اس‌دی‌اس در حضور انواع مختلف فاز نفتی نشان داده شده است.

شکل ۱۲ اثبات‌کننده اثر مخرب فاز نفتی بر پایداری فوم است. همانطور که مشاهده می‌شود، ورود مولکول‌های نفتی (با رنگ دانه‌های قرمز) به فیلم‌های حباب، موجب پارگی آن‌ها می‌شود. با جابجایی مولکول‌های نفت و تماس با حباب‌های مجاور، ناحیه ناپایداری توسعه یافته است؛ اما میزان ناپایداری برای انواع مختلف فاز نفتی، متفاوت است.

جهت مقایسه میزان تأثیرگذاری فاز نفتی بر پایداری حباب‌های

که می‌تواند مربوط به ضخامت فیلم‌های لاملایی آن باشد. از آنجایی که سلول افقی است و نیروی گرانش در تخلیه مایع از فیلم‌های لاملایی و پلاتیو نقشی ندارد، لاملایی‌های ضخیم‌تر مقاومت بیشتری به پخش گاز درون حباب دارد و در نتیجه فوم پایدارتر خواهد بود. نتایج این بخش در توافق با نتایج مشاهده شده در مرجع [۱۲] است.

جهت بررسی کمی نحوه تغییر بافت فوم در طول زمان، از توزیع اندازه حباب استفاده شده است. شکل ۱۱ توزیع اندازه حباب فوم‌های سی‌تب، اس‌دی‌اس، سی‌ای‌پی‌بی و سی‌ای‌پی‌بی‌اس‌دی‌اس را نشان می‌دهد. در ابتدا تمامی فوم‌ها دارای ریزترین توزیع اندازه حباب هستند. در شروع آزمایش، بافت درشت فوم سی‌تب موجب شده است تا تنها ۷۴ درصد از حباب‌های آن مساحتی کمتر از 2 mm^2 داشته باشند (شکل ۱۱ الف). حال آن‌که این درصد در خصوص فوم‌های اس‌دی‌اس، سی‌ای‌پی‌بی و سی‌ای‌پی‌بی‌اس‌دی‌اس به ترتیب ۹۸ درصد، ۷۹ درصد و ۹۶ درصد است (به ترتیب شکل‌های ۱۱ ب، پ، ت). با توجه به شکل ۱۱، رتبه‌بندی پایداری حباب‌های فوم بدون حضور تخلیه گرانشی مایع آن‌ها، به صورت سی‌تب‌اس‌دی‌اس سی‌ای‌پی‌بی سی‌ای‌پی‌بی‌اس‌دی‌اس بیان می‌شود. اندازه حباب‌های فوم سی‌تب در این زمان در یک ناحیه بسیار گسترده قرار می‌گیرد، به طوری که تنها ۵۰ درصد از حباب‌هایش در بازه اولیه قرار دارد؛ حال آن‌که در این زمان ۷۹ درصد از حباب‌های



شکل ۱۲. وضعیت کیفی فوم سی‌ای‌پی‌بی‌اس‌دی‌اس در حضور انواع مختلف فاز نفتی در زمان‌های ۰ و ۲۲۰ دقیقه از شروع آزمایش
 Fig. 12. The qualitative status of CAPBSDS foam in the presence of different types of oil phase at 0 and 220 minutes

جدول ۳. درصد کاهش طول نیمه‌عمر فوم سی‌ای‌پی‌بی‌اس‌دی‌اس در حضور انواع نفت در دو مقیاس حباب و انباشته

Table 3. The half-life time reduction of CAPBSDS foam in the presence of different types of oil in both bubble and bulk scales

کاهش طول نیمه‌عمر مقیاس انباشته (درصد)	کاهش طول نیمه‌عمر مقیاس حباب (درصد)	نوع نفت
۴۴	۴۵	سیلیکون آ
۴۷	۵۲	سیلیکون ب
۵۹	۶۵	دکان

روغن‌های سیلیکونی آ و ب است که در توافق با نتایج مشاهده شده در آزمایشات مقیاس انباشته و تحقیقات گذشته است [۸، ۱۰، ۱۲، ۱۹]. به جهت مقایسه و بررسی بیشتر، در جدول ۳، درصد کاهش طول نیمه‌عمر فوم سی‌ای‌پی‌بی‌اس‌دی‌اس در حضور انواع مختلف فاز نفتی در دو بستر آزمایشگاهی حباب و انباشته ارائه شده است. مقادیر جدول ۳ نشان‌دهنده توافق بین نتایج آزمایشات مقیاس انباشته و نتایج آزمایشات مقیاس حباب است.

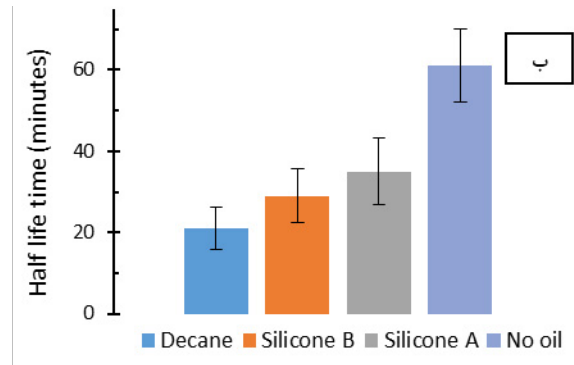
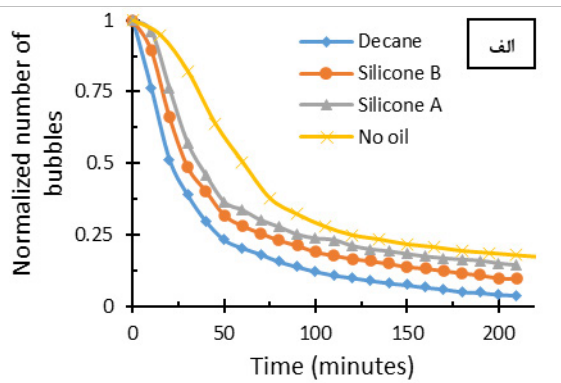
۳-۳ بررسی ویسکوزیته ظاهری فوم

۳-۳-۱ اثر کیفیت و نوع فوم بر ویسکوزیته ظاهری فوم

از جمله روش‌های اندازه‌گیری ویسکوزیته ظاهری فوم، استفاده

فوم، در شکل‌های ۱۳ الف و ۱۳ ب، به ترتیب تعداد حباب‌های اصلاح شده و طول نیمه‌عمر (کاهش تعداد حباب به نصف تعداد حباب اولیه) فوم سی‌ای‌پی‌بی‌اس‌دی‌اس در حضور و عدم حضور فازهای مختلف نفتی نشان داده شده است.

روند کاهش تعداد حباب اصلاح‌شده (شکل ۱۳ الف)، بیان‌کننده اثر قابل توجه نابودی حباب‌ها در حضور فاز نفتی به خصوص در نخستین دقایق آزمایش است. نتایج شکل‌های ۱۲ و ۱۳ نشان می‌دهد فوم در حضور دکان کمترین پایداری را دارد؛ به طوری که طول نیمه‌عمر فوم در حضور دکان، ۶۵ درصد کاهش داشته است (این عدد در مورد سیلیکون آ و سیلیکون ب به ترتیب ۴۳ و ۵۲ درصد است). دلیل این امر، چگالی و لزجت بسیار پایین دکان در مقایسه با



شکل ۱۳. (الف) تعداد حباب اصلاح شده و (ب) طول نیمه عمر فوم سی‌ای پی بی‌اس دی‌اس در حضور انواع مختلف فاز نفتی

Fig. 13. (a) The normalized number of bubbles and (b) the half-life time of the CAPBSDS foam in the presence of different types of oil phase

بالاتری دارد) [۲۲]. از طرف دیگر، کاهش کیفیت فوم موجب افزایش رطوبت فوم می‌شود. فوم‌های مرطوب، تحرک بیشتری نسبت به فوم‌های خشک دارند؛ زیرا حباب‌ها در فوم‌های مرطوب کروی شکل‌تر و یکسان‌تر هستند، برای همین تداخل مقاومت جریان بین حباب‌ها خیلی کمتر است [۲۸]. با این وجود، ویسکوزیته فوم‌های مرطوب همچنان به طور قابل توجهی بالاتر از ویسکوزیته اجزای تشکیل دهنده آن‌ها است (هوا و محلول سورفاکتانت).

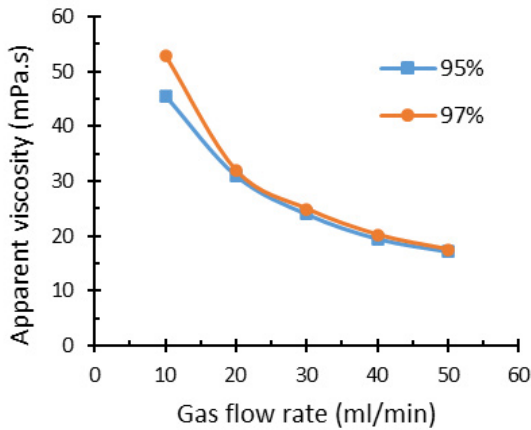
علاوه بر آن، در شکل ۱۴ مشاهده می‌شود که در کیفیت ثابت، فوم‌های اس‌دی‌اس، سی‌ای پی بی‌اس دی‌اس و سی‌ای پی بی ویسکوزیته بالاتری نسبت به فوم سی‌تب ثبت کرده‌اند. از آنجا که لزجت محلول سورفاکتانت تمامی فوم‌ها تقریباً یکسان است، تفاوت اصلی فوم سی‌تب نسبت به دیگر فوم‌های آزمایش، بافت درشت آن است. در تحقیقات گذشته، بافت فوم، یکی از پارامترهای حاکم بر ویسکوزیته ظاهری فوم بیان شده است [۲۷]. برای یک کیفیت فوم ثابت، فوم با بافت ریزتر دارای ویسکوزیته ظاهری بیشتری است و بالعکس؛ زیرا فوم محتوی حباب‌های کوچکتر، تنش بیشتری برای تغییر شکل نیاز دارد (تنش تغییر شکل بالاتر دلالت به ویسکوزیته بالاتر دارد). به علاوه از آنجایی که اتلاف جریان فوم درون یک بستر محبوس شامل حرکت منیسک^۲ مایع در طول آن است، حباب‌های کوچکتر نسبت به حباب‌های بزرگتر، طول کلی منیسک بر سطح بالاتری داشته که در نتیجه مقاومت بالاتری برای جریان از خود نشان داده و ویسکوزیته بالاتری خواهند داشت [۲۹]. البته بایستی توجه داشت که اگر

از معادله صفحه‌ای پوزی^۱ درون سلول هل‌شاو از طریق رابطه ذیل است [۲۷]:

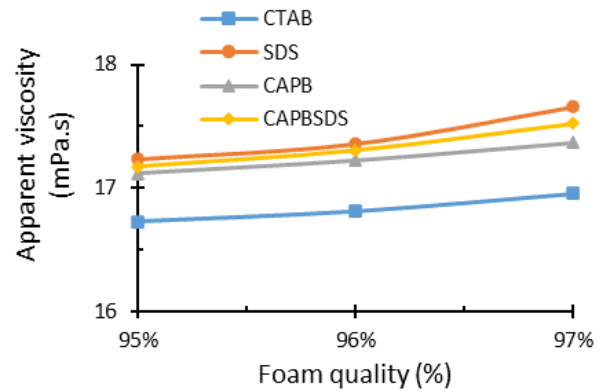
$$\mu = \frac{k\Delta p}{ql} = \frac{b^2\Delta p}{12ql} \quad (2)$$

در رابطه فوق، μ ویسکوزیته فوم، $k = \frac{b^2}{12}$ نفوذپذیری سلول (فاصله بین دو صفحه سلول)، q سرعت فوم (به عبارتی دبی حجمی فوم تقسیم بر سطح مقطع جریان)، l طول سلول هل‌شاو و $\frac{\Delta p}{l}$ گرادیان فشار درون سلول هل‌شاو است. در آزمایشات این قسمت، با تزریق همزمان هوا و محلول سورفاکتانت به درون فوم ساز، فوم در کیفیت‌های ثابت ساخته و به درون سلول وارد شده است. نرخ تزریق محلول سورفاکتانت بر اساس دبی حجمی هوا ($0.1 \text{ cm}^3/\text{min} \pm$) و کیفیت فوم تعیین می‌گردد. پس از پایا شدن جریان درون سلول، با اندازه‌گیری اختلاف فشار ورودی و خروجی، از طریق رابطه (۲) ویسکوزیته ظاهری فوم محاسبه می‌گردد. شکل ۱۴، رابطه بین کیفیت فوم و ویسکوزیته ظاهری آن را برای انواع مختلف فوم نشان می‌دهد.

نتایج شکل ۱۴ نشان می‌دهد که با افزایش کیفیت فوم، ویسکوزیته ظاهری آن افزایش می‌یابد که در توافق با مطالعات گذشته است [۱۲]. برای یک توده فوم، فوم با نسبت گاز بیشتر (کیفیت بالاتر)، تغییر شکل بیشتری جهت تسلیم و جریان نیاز دارد. از این رو تنش تسلیم بالاتری داشته و در نتیجه تحرک کمتری خواهد داشت (ویسکوزیته



شکل ۱۵. اثر تغییر نرخ جریان هوا بر ویسکوزیته ظاهری فوم
Fig. 15. The effect of air flow rate on the foam apparent viscosity



شکل ۱۴. اثر تغییر کیفیت فوم و نوع سورفاکتانت بر ویسکوزیته ظاهری فوم

Fig. 14. The effect of foam quality and surfactant type on the foam apparent viscosity

[۳ و ۲۷]. افزایش نرخ جریان گاز در کیفیت ثابت فوم، موجب افزایش تنش برشی و نرخ برش است. ولی به دلیل رشد سریعتر نرخ برش نسبت به تنش برشی، ویسکوزیته فوم کاهش می‌یابد [۲۲]. بر طبق شکل ۱۵، وابستگی ویسکوزیته ظاهری به کیفیت فوم با افزایش نرخ جریان فوم، کاهش یافته است که نشان‌دهنده کاهش اثر کیفیت فوم در مقایسه با نرخ جریان گاز بر روی ویسکوزیته ظاهری فوم در دبی‌های بالای آن می‌باشد.

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، به‌صورت آزمایشگاهی در دو مقیاس انباشته و حباب، پایداری فوم‌های ساخته شده از ۴ سورفاکتانت مختلف (سه سورفاکتانت برتر در مطالعات گذشته (آواس، سی‌تب، اس‌دی‌اس) و سورفاکتانت سی‌ای‌پی‌بی در حضور و عدم حضور فازهای نفتی مختلف (دکان، سیلیکون آ، سیلیکون ب، نفت خام) مطالعه شده است. پس از آن، عوامل موثر بر ویسکوزیته ظاهری انواع فوم درون سلول هل شاو بررسی و اندازه‌گیری شده است. بر طبق آزمایشات انجام شده، نتایج ذیل مشاهده شده است:

۱. نوع ماده سورفاکتانت تأثیر قابل توجهی در پایداری فوم دارد، به‌طوری‌که طول نیمه‌عمر فوم اس‌دی‌اس در حضور و عدم حضور دکان، به ترتیب ۴/۱ و ۴/۴ برابر فوم سی‌تب است.
۲. ساخت فوم از ترکیب ۲ یا چند سورفاکتانت می‌تواند به‌طور چشمگیری بر پایداری فوم تأثیرگذار باشد. لذا با معرفی فوم

میانگین اندازه حباب‌های فوم از اندازه فاصله بین دو صفحه بیشتر شود، حباب در فضای محصور بین دو صفحه به شکل مسطح قرار می‌گیرد. این مسطح شدن موجب افزایش اثر متقابل بین حباب‌ها و صفحات سلول شده که نتیجتاً موجب افزایش ویسکوزیته ظاهری فوم می‌گردد [۲۹].

نتایج فوق نشان می‌دهد کیفیت بیشتر فوم، الزاماً برابر با ویسکوزیته ظاهری بالاتر آن نیست، و بافت فوم و جنس ماده سورفاکتانت نیز بر آن تأثیر می‌گذارد؛ به‌طوری‌که فوم‌های خشک با دارا بودن حباب‌های کوچکتر، ویسکوزیته ظاهری بالاتری دارند. البته بایستی توجه داشت که بافت فوم علاوه بر جنس فوم، از پارامترهای دیگری مانند کیفیت فوم نیز تأثیر می‌پذیرد؛ زیرا با افزایش کیفیت فوم، نسبت حجم گاز به حجم مایع فوم افزایش یافته که موجب افزایش اندازه حباب‌های فوم می‌شود [۲].

۳-۲-۳ اثر نرخ جریان فوم بر ویسکوزیته ظاهری فوم

در این بخش اثر نرخ جریان هوا بر ویسکوزیته ظاهری فوم تحقیق شده است. در آزمایشات این بخش، نرخ جریان مایع بر طبق نرخ جریان گاز در کیفیت ثابت فوم محاسبه شده است. در شکل ۱۵ ویسکوزیته ظاهری فوم سی‌ای‌پی‌بی‌اس‌دی‌اس بر اساس نرخ جریان گاز در کیفیت‌های ۹۵ و ۹۷ درصد نشان داده شده است.

بر طبق شکل ۱۵ ویسکوزیته ظاهری فوم با افزایش نرخ جریان گاز کاهش می‌یابد. این نتیجه در توافق با نتایج دیگر مطالعات است

- [2] K. Ma, R. Lontas, C.A. Conn, G.J. Hirasaki, S.L. Biswal, Visualization of improved sweep with foam in heterogeneous porous media using microfluidics, *Soft Matter*, 10675-10669 (2012) (41)8.
- [3] G.J. Hirasaki, J.B. Lawson, Mechanisms of Foam Flow in Porous Media: Apparent Viscosity in Smooth Capillaries, (1985).
- [4] J.S. Lioumbas, E. Georgiou, M. Kostoglou, T.D. Karapantsios, Foam free drainage and bubbles size for surfactant concentrations below the CMC, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 103-92 (2015) 487.
- [5] S. Babamahmoudi, S. Riahi, Application of nano particle for enhancement of foam stability in the presence of crude oil: Experimental investigation, *Journal of Molecular Liquids*, 2018) 264).
- [6] L.L. Schramm, *Foams: fundamentals and applications in the petroleum industry*, An American Chemical Society (1994).
- [7] R. Farajzadeh, A. Andrianov, R. Krastev, G.J. Hirasaki, W.R. Rossen, Foam-oil interaction in porous media: Implications for foam assisted enhanced oil recovery, *Advances in Colloid and Interface Science*, 183â€“184 13-1 (2012).
- [8] A. Andrianov, R. Farajzadeh, M. Mahmoodi Nick, M. Talanana, P. L. J. Zitha, Immiscible foam for enhancing oil recovery: bulk and porous media experiments, *ACS Publication*, (2226-2214 (2012).
- [9] S.A. Farzaneh, M. Sohrabi, Experimental investigation of CO-2foam stability improvement by alkaline in the presence of crude oil, *Chemical Engineering Research and Design*, 389-375 (2015) 94.
- [10] M. Simjoo, T. Rezaei, A. Andrianov, P.L.J. Zitha, Foam stability in the presence of oil: Effect of surfactant concentration and oil type, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, (2013) 438 158-148.
- [11] A. Shokrollahi, M.H. Ghazanfari, A. Badakhshan, Application of foam floods for enhancing heavy oil recovery through stability analysis and core flood experiments, *The*
- سی‌ای‌پی‌بی‌اس‌دی‌اس که از سوفاکتانت ها اس‌دی‌اس و سی‌ای‌پی‌بی با نسبت ۱:۱ ساخته شده است، پایداری آن در مقایسه با فوم سی‌ای‌پی‌بی در حضور و عدم حضور دکان به ترتیب ۲۳۷ و ۳۳ درصد افزایش نشان می‌دهد.
۳. پایداری فوم سی‌ای‌پی‌بی‌اس‌دی‌اس در مقایسه با فوم اس‌دی‌اس در حضور دکان ۵۵ درصد افزایش داشته است.
۴. پایداری فوم سی‌ای‌پی‌بی‌اس‌دی‌اس به دلیل حضور مولکول‌های بتائین است که به موجب آن فشار موئینگی بحرانی فیلم‌های فوم افزایش می‌یابد.
۵. پایداری فوم در حضور فاز نفتی کاهش می‌یابد، اما میزان اثر ناپایدارکنندگی فاز نفتی با افزایش ویسکوزیته و دانسیته فاز نفتی کاهش یافته است.
۶. مشخصات بافت فوم (تعداد حباب، توزیع اندازه حباب و میانگین اندازه حباب) بر پایداری آن تأثیر می‌گذارد، به طوری که ریزترین بافت فوم با کمترین میزان تغییرات اندازه حباب می‌تواند متناظر با بیشترین پایداری فوم باشد.
۷. در آزمایشات مقیاس حباب مشخص گردید، که توزیع اندازه حباب فوم سی‌تب بسیار درشت بوده که به همراه نرخ درشت‌شدگی بالا، نشان‌دهنده پایداری کم آن است. در مقابل، فوم سی‌ای‌پی‌بی‌اس‌دی‌اس به دلیل بافت ریز، لاملایی‌های ضخیم و حباب‌های کروی بیشترین پایداری را دارد. همچنین اگرچه فوم آوایس طول نیمه‌عمر بالاتری نسبت به اس‌دی‌اس دارد، اما پایداری نهایی آن به دلیل پارگی گسترده حباب‌ها، و بالا بودن نرخ درشت‌شدگی کمتر از اس‌دی‌اس است.
۸. بافت فوم بر بر ویسکوزیته ظاهری فوم تأثیرگذار است، به طوری که فوم با حباب‌های کوچکتر، ویسکوزیته ظاهری بالاتری دارد.
۹. افزایش نرخ جریان فوم موجب کاهش ویسکوزیته ظاهری آن می‌شود. در نرخ‌های پایین جریان فوم، کیفیت آن بر ویسکوزیته ظاهری تأثیرگذار است، اما با افزایش نرخ جریان، این وابستگی از بین می‌رود.

مراجع

- [1] G.M. Homsy, Viscous Fingering in Porous Media, *Annual Review of Fluid Mechanics*, 311-271 (1987) (1)19.

- Petroleum Engineers, 1998.
- [21] F.M. Llave, F.T.H. Chung, R.W. Louvier, D.A. Hudgins, Foams as Mobility Control Agents for Oil Recovery by Gas Displacement, in, Society of Petroleum Engineers, 1990.
- [22] K. Osei-Bonsu, N. Shokri, P. Grassia, Fundamental investigation of foam flow in a liquid-filled Hele-Shaw cell, *Journal of Colloid and Interface Science*, (2016) 462 296-288.
- [23] X. Duan, J. Hou, T. Cheng, S. Li, Y. Ma, Evaluation of oil-tolerant foam for enhanced oil recovery: Laboratory study of a system of oil-tolerant foaming agents, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 438-428 (2014) 122.
- [24] L. Lobo, D.T. Wasan, Mechanisms of aqueous foam stability in the presence of emulsified non-aqueous-phase liquids: structure and stability of the pseudoemulsion film, *Langmuir*, 1677-1668 (1993) (7)9.
- [25] K. Koczko, L.A. Lobo, D.T. Wasan, Effect of oil on foam stability: Aqueous foams stabilized by emulsions, *Journal of Colloid and Interface Science*, 506-492 (1992) (2)150.
- [26] D.G. Elka S. Basheva, Nikolai D. Denkov, Kenichi Kasuga, Naoki Satoh, and Kaoru Tsujii, Role of Betaine as Foam Booster in the Presence of Silicone Oil Drops, *Langmuir*, 1013-1000 (2000) (3)16.
- [27] W. Yan, C.A. Miller, G.J. Hirasaki, Foam sweep in fractures for enhanced oil recovery, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 282-283 359-348 (2006).
- [28] M. B], Test data fill theory gap on using foam as a drilling fluid, *Oil&Gas*, (100-96 (1971).
- [29] i. Cantat, Liquid meniscus friction on a wet plate: Bubbles, lamellae, and foams, *Physics of Fluids*, (3)25 031303 (2013).
- Canadian Journal of Chemical Engineering, (2014) (11)92 1987-1975.
- [12] K. Osei-Bonsu, N. Shokri, P. Grassia, Foam stability in the presence and absence of hydrocarbons: From bubble-to bulk-scale, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 526-514 (2015) 481.
- [13] H. Cubillos, J. Montes, C. Prieto, P. Romero, Assessment of Foam for GOR Control to Optimize Miscible Gas Injection Recovery, in, Society of Petroleum Engineers, 2012.
- [14] M. Dalland, J.E. Hanssen, T.S.m. Kristiansen, Oil interaction with foams under static and flowing conditions in porous media, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, (1994) (2)82 140-129.
- [15] H. Caps, N. Vandewalle, G. Broze, Foaming dynamics in Hele-Shaw cells, *Physical Review E*, 065301 (2006) (6)73.
- [16] D.J. Durian, Foam Mechanics at the Bubble Scale, *Physical Review Letters*, 4783-4780 (1995) (26)75.
- [17] R. Rafati, O. Kehinde Oludara, S. Amin, H. Haddad, Hamidi, D. Rama Rao Karri, Experimental investigation of emulsified oil dispersion on bulk foam stability, (2018).
- [18] R. Rafati, A.S. Haddad, H. Hamidi, Experimental study on stability and rheological properties of aqueous foam in the presence of reservoir natural solid particles, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 31-19 (2016) 509.
- [19] R. Aveyard, B.P. Binks, P.D.I. Fletcher, T.G. Peck, C.E. Rutherford, Aspects of aqueous foam stability in the presence of hydrocarbon oils and solid particles, *Advances in Colloid and Interface Science*, 120-93 (1994) 48.
- [20] K. Mannhardt, J.J. Novosad, L.L. Schramm, Foam/Oil Interactions at Reservoir Conditions, in, Society of

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم
S.M. Razavi, M.M. Shahmardan, M. Nazari, M. Norouzi, *Experimental Study of Surfactant Type Effects on the Foam Stability and Mobility With the Approach of Enhancing Oil Recovery, Amirkabir J. Mech Eng., 53(Special Issue 1) (2021) 339-356.*

DOI: 10.22060/mej.2019.15736.6193

