

## Research Paper

# Enhancing the Uniformity of Emitter Air Bubble Delivery During Irrigation With Aerated Water

Mokhtar Miranzadeh<sup>1</sup>, Manouchehr Torabi<sup>2\*</sup>

1. Master of Science , Agricultural Engineering Research Department , Isfahan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, (AREEO), Isfahan, Iran

2. Instructor , Agricultural Engineering Research Department , Isfahan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, (AREEO), Isfahan, Iran

Received: 2016.4.19

Revised: 2019.10.6

Accepted: 2020.11.24

Use your device to scan and read  
the article online



DOI:[10.30495/wej.2021.4585](https://doi.org/10.30495/wej.2021.4585)

### Keywords:

Oxygation, aeration,  
surfactant, distribution  
uniformity, air bubbles

### Abstract

**Introduction:** Oxygation is a variant of subsurface drip irrigation in which ambient air is injected through the system via a venturi, thereby plant roots receive air and water simultaneously. The objective of this research was to study the effect of two surfactants and certain ratios of them on the uniformity distribution of emitter air flow rates along lateral pipes in an oxygation system.

**Materials and Methods:** Two non-ionic surfactants, namely, Triton X-100 and Tween 80, and three mixtures of them with different ratios including 2:1, 1:1, and 1:2 were added to irrigation water and the results were compared to the case where no surfactant was used. For statistical analysis of data, the Kolmogorov-Smirnov and Friedman tests along with Christiansen Uniformity Coefficient were used.

**Findings:** In the absence of surfactants, Christiansen uniformity coefficient (CUC) for emitter air flow rates was -67 percent. The relative increase in CUC, when Triton X-100, Tween 80, and the ratios 2:1, 1:1, and 1:2 were applied, amounted to 211, 162, 210, 213, and 206 percent, respectively.

**Conclusion:** The results of this research clearly indicates that application of surfactant mixtures with synergic interaction will effectively enhance distribution uniformity of emitter air flow rates.

**Citation:** Miranzadeh M, Torabi M. Enhancing the Uniformity of Emitter Air Bubble Delivery During Irrigation With Aerated Water. Water Resources Engineering Journal. 2021; 14 (48): 1- 15.

\*Corresponding author: Manouchehr Torabi

Address: Isfahan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Amirieh Town, Isfahan, Iran

Tell: 03137760061

Email: mctorabi@yahoo.com

## Extended Abstract

### Introduction

Over the recent decades a variety of methods, including ozone injection (1), addition of hydrogen peroxide to irrigation water (2) and connection of an air injector venturi to the subsurface drip irrigation (known as oxygation) have been invented to supply sufficient oxygen to the plant root zone. Initial studies on the oxygation method revealed that emitter airflow rates (EAFR) are non-uniformly distributed along the lateral pipes (5). The objective of this research was to study the effect of two types of non-ionic surfactants and three ratios of them on the uniformity distribution of EAFRs along lateral pipes in an oxygation system.

### Materials and Methods

The oxygation system consisted of a 100-L water tank connected in series to an electric centrifugal pump and a 51-m-long low-density polyethylene irrigation pipe of 16 mm internal diameter, fitted with 49 pressure compensated pot emitters, each of 4.0 L h<sup>-1</sup> flow rate. The emitters were 1 meter apart across the pipe, such that the first emitter was 2.6 m from the air injector venturi. EAFRs were measured using the method presented by Torabi et al. (5). Two biodegradable non-ionic surfactants, Triton X-100 and Twin 80 and three mixtures of them at the ratios of 1:1, 1:2 (i.e. one-part Triton X-100 to two parts Twin 80) and 2:1 were used in this study. The treatments were denoted as X<sub>0</sub>, X<sub>1</sub>, X<sub>0.5</sub>, X<sub>0.33</sub> and X<sub>0.67</sub>, respectively, where the indices indicate the mole fraction of Triton X-100 in the mixture. The results were compared to the control treatment (X<sub>c</sub>), where no surfactant was added to the aerated water. The EAFRs were analyzed by Christiansen Uniformity Coefficient (CUC), and Kolmogorov-Smirnov (KS) and Friedman tests (p≥0.05).

### Findings

KS test was performed on EAFRs measured from 17 emitters for treatments X<sub>0</sub>, X<sub>0.33</sub>, X<sub>0.5</sub>, X<sub>0.67</sub>, X<sub>1</sub> and X<sub>c</sub>. The calculated KS statistics for the said treatments were 0.924, 0.992, 0.996, 0.996, 0.996 and 0.941; indicating non-

normal distribution of the data at p≥0.05. Further analysis of the data by means of Friedman test revealed significant difference at p≥0.05 among the treatments. The CUC of EAFRs for X<sub>c</sub> was -67%, indicating a very poor distribution of air bubbles along the irrigation pipe. Contrasted to X<sub>c</sub>, the calculated CUCs for X<sub>0</sub>, X<sub>1</sub>, X<sub>0.5</sub>, X<sub>0.33</sub> and X<sub>0.67</sub> were 41.3%, 74.4%, 75.5%, 70.9% and 73.8%, respectively.

### Discussion

Careful examination of the EAFR data of the control treatment suggest that the emitters behave like fully open conduits when air bubbles are available for discharge, despite the fact that the emitters were pressure compensated. It follows that emitters located closer to the venturi will have access to the majority of the air bubbles; whereas emitters located far from the venturi will have no or little access to air bubbles. The reason could be explained by the extreme difference between three main physical properties of water and air. At standard conditions, the density, dynamic viscosity and modulus of elasticity of water are 1000 kg m<sup>-3</sup>, 1.002×10<sup>-3</sup> kg m<sup>-1</sup> s<sup>-1</sup> and 2.19 GPa, respectively. For air, at standard conditions, the foregoing parameters are 1.29 kg m<sup>-3</sup>, 1.781×10<sup>-5</sup> kg m<sup>-1</sup> s<sup>-1</sup> and 1.35×10<sup>-4</sup> GPa, respectively (26, 27). Addition of surfactant, regardless of its type, to irrigation water, significantly improved the calculated CUC of EAFRs. This could be ascribed to the effect of surfactants in reduction of water surface tension (30), which leads to reduction in the size of air bubbles (33), thereby preventing them from coalescence (31, 32), and finally reduction in the velocity rise of the air bubbles (36) resulting in more uniform distribution of them across the pipe cross section. Addition of Triton X-100 and Tween 80 to water leads to reduction in water surface tension of 38.1 and 18.8 mN m<sup>-1</sup>, respectively (34, 35). The measured critical micelle concentration (CMC) for X<sub>0.33</sub>, X<sub>0.5</sub> and X<sub>0.67</sub> were 0.0138, 0.0151 and 0.0282 mM, respectively (26). The corresponding CMC values calculated by Clint's equation

were 0.0161, 0.021 and 0.0304 mM, respectively. A comparison between the measured and the calculated CMCs for the foregoing treatments revealed that the behavior of the mixed surfactants was not ideal. Moreover, the computed interaction parameters for  $X_{0.33}$ ,  $X_{0.5}$  and  $X_{0.67}$  were -2.539, -3.122 and -0.816, respectively. The negative signs indicate synergic effect between the two surfactants in the mixtures. However, due to the small absolute values of the interaction parameters, the synergic effects were not strong. The activity coefficients of Triton X-100 in the mixed micelle for  $X_{0.33}$ ,  $X_{0.5}$  and  $X_{0.67}$  were 0.144, 0.142 and 0.544, respectively. The corresponding values for Tween 80 for the same treatments were 0.960, 0.871 and 0.985, respectively. Obviously, the activity coefficients of Tween 80 were markedly larger (close to unity) than the corresponding values for Triton X-100. This explains the reason why addition of Triton X-100 to the aerated water further improved the CUC of EAFRs more than Tween 80 did. It is worthy of note that the positive effect of surfactants in improving accessibility of distant emitters to air bubbles was restricted to only 80% of the total length of the irrigation pipe. Further analysis of this finding requires precise measurement of the injected air into the oxygenation system to be compared with the total volume of discharged air from the emitters.

### Conclusion

In the absence of surfactant, distribution of EAFRs were extremely non-uniform.

Addition of surfactants to the aerated water significantly improved CUC of the EAFRs. The type and chemical composition of surfactants will have crucial effect on the resulting uniformity of air bubbles along an irrigation pipe. There was a direct relationship between water surface tension and the uniformity of air bubble distribution. In other words, addition of surfactant to irrigation water led to a reduction in the surface tension, which in return, resulted in an increase in the number of air bubbles of relatively small size. The reduction in the diameter of air bubbles accordingly caused a

reduction in their rise velocity, thereby improving accessibility of distant emitters to air bubbles.

### Ethical Considerations

#### Compliance with ethical guidelines

All subjects fulfill the informed consent.

### Funding

This research was fully funded by Agricultural Research, Education and Extension Organization.

### Authors' contributions

Design and conceptualization, Methodology and data analysis: Mokhtar Miranzadeh; Supervision and final writing: Manouchehr Torabi.

### Conflicts of interest

The authors declared no conflict of interest.

## مقاله پژوهشی

## بهبود یکنواختی توزیع بده هوای قطره‌چکان‌ها در سامانه‌های اکسیژن-آبیاری

مختار میران زاده<sup>۱</sup>، منوچهر ترابی<sup>۲\*</sup>

۱. کارشناس ارشد بخش تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان اصفهان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، اصفهان، ایران

۲. مربی بخش تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان اصفهان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، اصفهان، ایران

## چکیده

**مقدمه و هدف:** اکسیژن-آبیاری روشی است که در آن با استفاده از ونتوری، هوا به سامانه آبیاری قطره‌ای زیرسطحی تزریق می‌شود تا ریشه گیاه آب‌وهوا را به‌طور هم‌زمان دریافت کند. هدف از تحقیق حاضر بررسی تاثیر نسبت های مختلف اختلاط دو نوع سرفکتانت بر بهبود یکنواختی توزیع بده هوا در سامانه های آبیاری قطره ای زیرسطحی بود.

**مواد و روش‌ها:** توزیع بده هوای خروجی از یک سامانه اکسیژن-آبیاری در شرایط حضور دو سرفکتانت غیر یونی ترایتون ایکس-۱۰۰ و توئین ۸۰ و سه نسبت اختلاط این دو با یکدیگر شامل ۱:۱، ۱:۲ و ۱:۳ در آب آبیاری، مطالعه و نتایج باحالتی که جریان آب و هوا فاقد سرفکتانت بود، مقایسه شدند. برای تجزیه و تحلیل یافته ها از ضریب یکنواختی کریستیانسن، و آزمون‌های کولموگوروف-اسمیرنوف و فریدمن استفاده شد ( $P \leq 0.05$ ).

**یافته‌ها:** در غیاب سرفکتانت‌ها، ضریب یکنواختی توزیع کریستیانسن (CUC) برای بده هوای قطره‌چکان‌ها ۶۷- درصد بود. میزان افزایش نسبی CUC در حالتی که از ترایتون ایکس-۱۰۰، توئین ۸۰، نسبت اختلاط ۱:۲، ۱:۱ و ۲:۱ این سرفکتانت‌ها استفاده شده بود، به ترتیب ۲۱۱، ۱۶۲، ۲۱۰، ۲۱۳ و ۲۰۶ درصد به دست آمد.

**بحث و نتیجه‌گیری:** نتایج حاکی از آن است که به دلیل وجود خاصیت برهم‌افزایی بین این دو نوع سرفکتانت، استفاده از مخلوط آن‌ها می‌تواند به نحو مؤثرتری باعث بهبود یکنواختی توزیع هوای قطره‌چکان‌ها بشود.

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۱/۳۱

تاریخ داوری: ۱۳۹۸/۷/۱۴

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۹/۴

از دستگاه خود برای اسکن و خواندن مقاله به صورت آنلاین استفاده کنید



DOI:10.30495/wej.2021.4585

## واژه‌های کلیدی:

اکسیژن-آبیاری، تهویه، سرفکتانت، یکنواختی توزیع، حباب‌های هوا

## مقدمه

با توجه به اهمیت غیر قابل انکار اکسیژن در عملکرد ریشه گیاهان زراعی، روش‌های متعددی برای تأمین اکسیژن موردنیاز ریشه طی چند دهه اخیر ابداع شده و به‌کار رفته‌اند. ازجمله این روش‌ها می‌توان به تزریق گاز ازون در سامانه آبیاری قطره‌ای (۱) و یا اضافه نمودن محلول آب اکسیژنه (پراکسید هیدروژن) به آب آبیاری (۲) اشاره نمود. علی‌رغم تاثیر مثبتی که این دو روش بر رشد و عملکرد گیاهان داشتند، به دو دلیل مورد استقبال کشاورزان قرار نگرفتند. نخست این‌که، هزینه تهیه و تولید گاز ازون و یا محلول آب اکسیژنه نسبتاً زیاد است. دوم، هم‌گاز

ازون و هم محلول آب اکسیژنه جزء مواد ضد عفونی کننده بشمار می‌آیند و استفاده از آن‌ها می‌تواند حیات میکروارگانیسم‌های خاک و حتی در برخی اوقات، سلامت سلول‌های گیاهی را نیز به‌خطر اندازد. علاوه بر این، هر دو ماده یاد شده قدرت اکسیدکنندگی بسیار بالایی دارند. این خاصیت می‌تواند باعث تجزیه سریع مواد آلی خاک شود، که این امر در خاک‌های فقیر از مواد آلی ایران، یک عیب بزرگ محسوب می‌شود. نخستین بار، گوراهو و همکاران (۳) با نصب ونتوری تزریق هوا روی لوله اصلی یک سامانه آبیاری قطره‌ای زیرسطحی، تأثیر اکسیژن-آبیاری را بر رشد گیاه فلفل دلمه‌ای بررسی کردند.

## \* نویسنده مسئول: منوچهر ترابی

**نشانی:** مربی بخش تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان اصفهان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج

کشاورزی، اصفهان، ایران

تلفن: ۰۳۱۳۷۷۶۰۰۶۱

پست الکترونیکی: [mctorabi@yahoo.com](mailto:mctorabi@yahoo.com)

قسمت "سر" مولکول آن‌ها انجام می‌شود. بدین ترتیب، چنانچه بار یونی از نوع مثبت، منفی، هم مثبت و هم منفی، و یا بدون بار باشد، سرفکتانت به ترتیب از نوع کاتیونی، آنیونی، زویتریونی<sup>۶</sup>، و یا غیر یونی طبقه‌بندی می‌شود (۷).

با اضافه شدن سرفکتانت به محلول‌های آبی، مولکول‌های سرفکتانت شروع به تجمع در اطراف یکدیگر کرده و تشکیل واحدهایی به نام میسل<sup>۴</sup> می‌دهند. در غلظت معینی از میسل‌ها که به غلظت بحرانی میسل<sup>۵</sup> (CMC) معروف است، خواص فیزیکی محلول به ویژه کشش سطحی، هدایت الکتریکی، قدرت پاک‌کنندگی، فشار اسمزی، گرانروی<sup>۶</sup>، قطبیت<sup>۷</sup>، حرارت ویژه<sup>۸</sup>، قدرت انحلال و شاخص پراکنش نور<sup>۹</sup> به نحو قابل ملاحظه‌ای تغییر می‌کند (۸ و ۹). به همین دلیل، در کاربردهای صنعتی و تجاری و یا مطالعات تحقیقاتی، از سرفکتانت‌ها در غلظت بحرانی میسل آن‌ها استفاده می‌شود. این ویژگی‌ها باعث شده است که امروزه سرفکتانت‌ها در صنایع گوناگونی از جمله مواد شوینده و پاک‌کننده، لوازم آرایشی و بهداشتی، نساجی، چرم، رنگ و پوشش‌های حفاظتی، کاغذ و مواد سلولزی، معدن، صنایع داروسازی و پزشکی، فرآوری فلزات، صنایع غذایی و بسته‌بندی، شیمی، پتروشیمی، و کشاورزی به کار روند (۱۰).

هنگامی که دو یا چند نوع سرفکتانت به نسبت معینی با یکدیگر مخلوط شوند، به دلیل احتمال برهم‌افزایی<sup>۱۰</sup>، خواص و کارایی مخلوط حاصله به نحو بارزی برتر از خواص و عملکرد هر یک از سرفکتانت‌ها (به تنهایی) خواهد بود (۱۱). این امر باعث صرفه‌جویی قابل‌توجهی در هزینه و نیز کاهش آلودگی محیط زیست می‌شود. علاوه بر این، در مقایسه با کاربرد انفرادی هر سرفکتانت، استفاده از مخلوط دو یا چند سرفکتانت در دامنه گسترده‌ای از درجه حرارت، شوری و سختی آب امکان‌پذیر است (۱۲).

هدف از این پژوهش، بررسی امکان بهبود یکنواختی توزیع بده هوای خروجی از قطره‌چکان‌ها با افزودن دو نوع سرفکتانت و سه نسبت مختلف از اختلاط این دو سرفکتانت به آب آبیاری بود.

## مواد و روش‌ها

لوازم آزمایش شامل یک مخزن آب ۱۰۰ لیتری متصل به شیر آب و شناور به‌منظور کنترل سطح آب در مخزن، یک دستگاه پمپ گریز از مرکز به قدرت ۰/۵ کیلووات و آبدهی ۳۷ لیتر در دقیقه، یک ونتوری تزریق هوا مدل ۲۸۷ ساخت شرکت Mazzei، و یک لوله آبیاری از جنس پلی‌اتیلن به قطر داخلی ۱۶ میلی‌متر و طول ۵۱ متر بود. تعداد ۴۹ قطره‌چکان از نوع جبران فشار با آبدهی  $4 \text{ L h}^{-1}$  و به فاصله ۱ متر از یکدیگر روی لوله آبیاری نصب شدند به نحوی که اولین قطره‌چکان به فاصله ۲/۶ متر از ونتوری قرار داشت. اتصال قطره‌چکان‌ها به لوله آبه از طریق بست‌های ابتدایی و لوله‌های اسپانگی انجام شد. هر قطعه

نتایج آن پژوهش نشان داد که اکسیژن-آبیاری موجب افزایش ۳۹ درصد در وزن و ۳۳ درصد در تعداد فلفل‌ها شد. نکته قابل‌تأملی که در این گزارش به آن اشاره شد، این است که تأثیر مثبت اکسیژن-آبیاری بر عملکرد فلفل دلمه‌ای از ابتدای لوله آبه تا فاصله ۲۸ متر به طرف پایین‌دست مشاهده شده است. از این نقطه تا فاصله ۵۱ متری نسبت به ابتدای لوله، تأثیر مثبت اکسیژن‌رسانی به عمق توسعه ریشه‌ها روندی نزولی را از خود نشان داد، به نحوی که در هشت متری انتهای لوله آبه (کل طول لوله ۵۹ متر بود) عملکرد گیاهان تفاوت معنی‌داری نسبت به تیمار شاهد (آبیاری با آب تهویه نشده) نداشت.

همچنین، در آزمایش دیگری که روی گوجه فرنگی انجام شده بود (۴)، مشاهده شد که عملکرد گیاهان اکسیژن-آبیاری شده در بالادست هر لوله‌ی آبه به طول ۳۰۰ متر، به طرز معنی‌داری بیش‌تر از گیاهانی بود که در قسمت پایین‌دست همان لوله قرار داشتند. اگرچه در این دو پژوهش، اشاره صریحی به روند نزولی بده هوای خروجی از قطره‌چکان‌ها در امتداد لوله آبه نشده بود، با این حال آزمایش‌های متعددی که توسط ترابی و همکاران (۵) در شرایط استفاده از لوله‌های آبه با قطرهای مختلف، بست‌های ابتدایی با شکل‌های هندسی و طول‌های متفاوت، و قطره‌چکان‌هایی با بده‌های مختلف انجام شدند، همگی مؤید این واقعیت هستند که توزیع بده هوای خروجی از قطره‌چکان‌ها همواره از روندی نزولی پیروی می‌کند.

بدون شک، غیریکنواخت بودن توزیع بده هوای خروجی از قطره‌چکان‌ها تأثیری منفی بر کارایی سامانه اکسیژن-آبیاری خواهد داشت و متعاقباً منجر به غیریکنواختی در رشد و عملکرد محصول می‌شود. یکی از راه‌های بهبود و افزایش یکنواختی توزیع بده هوای قطره‌چکان‌ها، اضافه کردن مواد فعال سطحی (سرفکتانت) به آب آبیاری است. ترابی و همکاران (۶)، تأثیر دامنه وسیعی از غلظت‌های یک نوع سرفکتانت ( $1/2 - 10 \text{ ppm}$ ) به نام آلکوکسیلات<sup>۲</sup> الکل (با نام تجاری BS 1000™) را بر یکنواختی توزیع بده هوای قطره‌چکان‌ها آزمودند. نتایج نشان داد که با اضافه کردن  $1/2 \text{ ppm}$  سرفکتانت به آب آبیاری، ضریب یکنواختی توزیع بده هوای قطره‌چکان‌ها از ۲۰ درصد (در مورد آب فاقد سرفکتانت) به ۸۰ درصد افزایش یافت که حاکی از بهبود قابل ملاحظه‌ای در توزیع بده هوای قطره‌چکان‌ها دارد. سرفکتانت‌ها موادی شیمیایی از نوع ترکیبات آلی هستند که مولکول‌های آن‌ها از دو جزء یا گروه کاملاً متفاوت، موسوم به "سر" و "دم" تشکیل شده‌اند. قسمت "سر" مولکول خاصیت قطبی دارد و آب‌دوست است (و در نتیجه، تمایل به جذب شدن در آب دارد)، در حالی که قسمت "دم" غیرقطبی است و آب‌گریز می‌باشد (و تمایل به جذب در چربی یا حلال‌های آلی دارد). طبقه‌بندی سرفکتانت‌ها بر اساس نوع بار یونی

6 Viscosity

7 Polarity

8 Specific Heat

9 Refractive Index

10 Synergism

1 Surface active agent (Surfactant)

2 Alcohol alkoxyolate

3 Zwitterionic

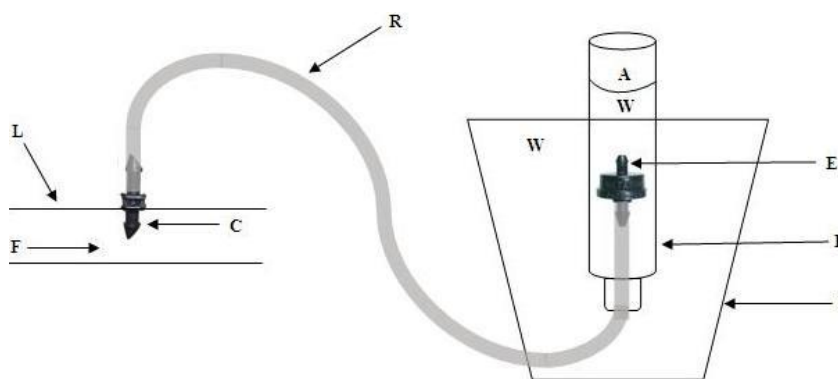
4 Micelle

5 Critical Micelle Concentration

زمان نیز یادداشت می‌شد. هم‌زمان با ورود آب و هوا از قطره‌چکان به درون بطری، حباب‌های هوا به علت سبکی در قسمت بالای بطری جمع می‌شد و به اندازه حجمی که اشغال می‌کرد، آب از بطری تخلیه و به درون سطل وارد می‌شد. خاتمه اندازه‌گیری زمانی بود که حجم آب باقی‌مانده در بطری تقریباً به نیمه می‌رسید. در این هنگام، قطره‌چکان از بطری خارج و درب آن در زیر آب بسته و وزن آب باقی‌مانده در بطری (همراه با درب آن) به وسیله یک ترازوی دقیق (با دقت ۰/۰۱ گرم) اندازه‌گیری می‌شد. مابه‌التفاوت وزن آب بطری قبل و پس از آزمایش، نشان دهنده حجم هوای خارج‌شده از قطره‌چکان در طول مدت اندازه‌گیری می‌باشد.

لوله اسپاگتی به قطر ۴ میلی‌متر و طول ۵۰ سانتی‌متر بود که یک سرش به قطره‌چکان و سر دیگرش به یک انتهای بست ابتدایی متصل بود. انتهای دیگر بست ابتدایی (سمتی که رزوه دار بود) روی لوله آبدۀ محکم شده بود.

بدۀ هوای هفده قطره‌چکان (شامل اولین و آخرین قطره‌چکان) که به فاصله ۳ متر از یکدیگر قرار داشتند، از روش ارائه‌شده توسط تراپی و همکاران (۵) با کمی تغییر، به شرح زیر استفاده شد. به ازای هر قطره‌چکان یک سطل پر از آب و یک بطری پلاستیکی (دارای درب) به حجم ۵۳۰ میلی‌لیتر تهیه شد. ابتدا، وزن بطری پر از آب به همراه درب آن اندازه‌گیری شد. سپس، بطری پلاستیکی مملو از آب به‌طور وارونه، تا نیمه ارتفاع بطری داخل سطل آب قرار داده شد. نهایت دقت به عمل آمد تا در این مرحله هیچ حباب هوایی درون بطری وجود نداشته باشد. به محض قرار دادن قطره‌چکان درون بطری (شکل ۱)،



شکل ۱- لوازم مورد استفاده در اندازه‌گیری بدۀ هوای خروجی از قطره‌چکان. L: لوله آبدۀ، F: جهت حرکت سیال، C: بست ابتدایی، R: لوله اسپاگتی، P: سطل، B: بطری، E: قطره‌چکان، W: آب، A: هوا.

دو نوع سرفکتانت غیر یونی زیست‌تجزیه‌پذیر<sup>۳</sup> به نام‌های تریتون ایکس-۱۰۰<sup>۴</sup> و توئین ۸۰، و مخلوط‌هایی از این دو به نسبت ۱:۱، ۱:۲، و ۲:۱ به کار رفت (پنج تیمار حاوی سرفکتانت، به‌علاوه یک تیمار بدون سرفکتانت به‌عنوان تیمار شاهد؛ جمعاً شش تیمار). نام شیمیایی تریتون ایکس-۱۰۰ پلی‌اکسی‌اتیلن-۱۰-ایزواکتیل فنیل اتر، فرمول شیمیایی آن  $C_{34}H_{62}O_{11}$ ، و وزن مولکولی اش  $646 \text{ g mol}^{-1}$  است (۱۵ و ۱۶). حق و همکاران (۱۷) مقدار CMC را برای تریتون ایکس-۱۰۰ معادل  $0.25 \text{ mM}$  اندازه‌گیری کرده‌اند. نام شیمیایی سرفکتانت توئین ۸۰، پلی‌اکسی‌اتیلن-(۲۰)-سوربیتان-مونولات، فرمول شیمیایی آن  $C_{64}H_{124}O_{26}$ ، و وزن مولکولی اش  $1310 \text{ g mol}^{-1}$  است (۷). لیو و همکاران (۱۸) مقدار CMC را برای توئین ۸۰ معادل  $0.11 \text{ mM}$  برآورد کرده‌اند. همان گونه که در مقدمه نیز ذکر شد، اضافه شدن سرفکتانت به آب باعث کاهش کشش سطحی آب می‌شود. از آنجایی که حداکثر کاهش کشش سطحی آب در CMC رخ می‌دهد، بنابراین، غلظت سرفکتانت به کاررفته در هر تیمار معادل CMC همان سرفکتانت

برای سنجش یکنواختی توزیع بدۀ هوای قطره‌چکان‌ها از ضریب یکنواختی کریستیانسن استفاده شد (۱۳):

$$CUC = 100 \times \left( 1 - \frac{\sum_{i=1}^n |q_i - \mu|}{\sum_{i=1}^n q_i} \right) \quad (1)$$

در معادله (۱)، CUC ضریب یکنواختی کریستیانسن (درصد)، میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده بدۀ هوای خروجی از قطره‌چکان‌ها ( $L$ )  $q_i$ ، بدۀ هوای آمین قطره‌چکان ( $L h^{-1}$ ) و  $n$  تعداد اندازه‌گیری‌ها (هفده قطره‌چکان) می‌باشد. لازم به ذکر است که قبل از آغاز آزمایش‌ها، ضریب تغییرات<sup>۱</sup> قطره‌چکان‌های هفده‌گانه برای جریان آب اندازه‌گیری شد که مقدار آن  $3/4$  درصد بود. با توجه به این ضریب، عملکرد قطره‌چکان‌ها در رده "خوب" ارزیابی می‌شود (۱۴).

<sup>3</sup> Triton X-100  
<sup>4</sup> Tween 80

<sup>1</sup> Coefficient of Variations  
<sup>2</sup> Biodegradable

علامت جبری پارامتر  $\square$  بیان‌کننده کیفیت برهم‌کنش، و قدر مطلق این پارامتر نشان‌دهنده شدت برهم‌کنش می‌باشد. بدین‌صورت که علامت منفی نشان‌دهنده وجود برهم‌افزایی<sup>۲</sup>، و علامت مثبت دال بر وجود تقابل<sup>۳</sup> است. چنانچه پارامتر  $\square$  صفر شود، دلیل بر آرمانی بودن رفتار میسل مخلوط می‌باشد. در حالت اخیر،  $\square_i = \square_j = 1$  و رابطه (۳) به صورت ساده شده زیر، که به معادله کلینت موسوم است، تبدیل خواهد شد (۲۳):

$$\frac{1}{CMC^*} = \frac{X_i}{CMC_i} + \frac{1-X_i}{CMC_j} \quad (۸)$$

بدیهی است، تفاوت بین  $CMC^*$  محاسبه‌شده از معادله (۸) با مقدار اندازه‌گیری شده آن، دلالت بر رفتار غیرآرمانی مخلوط سرفکتنت‌ها دارد. در شرایط آرمانی، فراکسیون مولی سرفکتنت  $i$  از معادله زیر محاسبه می‌شود (۲۴):

$$x_i^{id} = \frac{(X_i \times CMC_j)}{(X_i \times CMC_j) + [CMC_i \times (1 - X_i)]} \quad (۹)$$

شایان ذکر است که تفاوت بین  $X_i$  و  $x_i^{id}$  نیز مؤید رفتار غیر آرمانی مخلوط دو سرفکتنت خواهد بود (۲۵). اطلاعات مربوط به وزن سرفکتنت (یا سرفکتنت‌های) مصرف شده در هر آزمایش و نیز  $CMC$  هر سرفکتنت (یا  $CMC$  حاصل از اختلاط دو نوع سرفکتنت) در جدول (۱) آمده است.

قبل از انجام تحلیل واریانس روی داده‌های اندازه‌گیری شده، ابتدا آزمون نرمال بودن توزیع داده‌ها (آزمون کولموگوروف-اسمیرنوف<sup>۴</sup>) انجام و سپس با توجه به غیر مستقل بودن نمونه‌های اندازه‌گیری شده، از آزمون فریدمن<sup>۵</sup> برای این تحقیق، راجع به معنی‌دار بودن اختلاف بین توزیع داده‌ها در تیمارهای آزمایش استفاده شد.

### نتایج و بحث:

آزمون کولموگوروف-اسمیرنوف روی بده هوای اندازه‌گیری شده در هفده نقطه از طول لوله آبیاری برای تیمارهای  $X_{0.5}$ ،  $X_{0.33}$ ،  $X_0$ ،  $X_{0.67}$ ،  $X_1$  و تیمار شاهد (با علامت اختصاری  $X_C$ ) انجام شد. اندیس‌ها بیان‌گر سهم سرفکتنت توئین ۸۰ بر حسب جزء مولی می‌باشد. مقدار محاسبه شده آماره کولموگوروف-اسمیرنوف برای تیمارهای یاد شده به ترتیب ۰/۹۲۴، ۰/۹۹۲، ۰/۹۹۶، ۰/۹۹۶، ۰/۹۹۶، ۰/۹۹۶ و ۰/۹۴۱ بود. مقایسه این آماره‌ها با مقدار بحرانی متناظر به آن‌ها از جدول کولموگوروف-اسمیرنوف با درجه آزادی ۱۷ و سطح احتمال ۰/۰۵ (عدد ۰/۳۱۸) نشان داد که داده‌ها در تمام تیمارها از توزیع غیر نرمال پیروی می‌کنند. در مرحله بعد، برای این که مشخص شود که آیا نوع سرفکتنت، نسبت اختلاط آن‌ها با یکدیگر، و یا اساساً وجود یا عدم وجود سرفکتنت در آب آبیاری تأثیری بر توزیع بده هوای خروجی از قطره‌چکان‌ها دارد یا خیر، از آزمون غیرپارامتری فریدمن استفاده شد. براساس نتایج نشان

انتخاب شد. برای محاسبه جرم سرفکتنت برای نیل به یک مولاریته (یا غلظت مولی) مشخص، از رابطه زیر استفاده شد (۱۹):

$$m = V \times C \times mw \quad (۲)$$

در رابطه (۲)،  $m$  جرم سرفکتنت برحسب گرم،  $V$  حجم محلول برحسب لیتر (در این آزمایش، ۱۰۰ لیتر)،  $C$  مولاریته برحسب مول بر لیتر (برای توئین ۸۰ و تریتون ایکس-۱۰۰ به ترتیب ۰/۰۰۰۰۱۱ و ۰/۰۰۰۲۵ مول بر لیتر که با علامت  $M$  نشان داده می‌شود)، و  $mw$  جرم مولکولی سرفکتنت برحسب گرم بر مول می‌باشد.

در حالت کلی، زمانی که دو سرفکتنت با هم مخلوط می‌شوند (در اینجا، آن‌ها را به نام سرفکتنت  $i$  و  $j$  مشخص می‌کنیم)، بر اساس فرضیه انحلال عادی رویینگ<sup>۱</sup> بین  $CMC$  مخلوط و  $CMC$  هر یک از سرفکتنت‌ها رابطه زیر حاکم است (۲۰):

$$\frac{1}{CMC^*} = \frac{X_i}{\gamma_i CMC_i} + \frac{(1-X_i)}{\gamma_j CMC_j} \quad (۳)$$

در معادله (۳)،  $CMC^*$  غلظت بحرانی میسل حاصل از اختلاط دو نوع سرفکتنت (برحسب mM) که معمولاً در آزمایشگاه اندازه‌گیری می‌شود،  $X_i$  فراکسیون مولی سرفکتنت  $i$  در محلول مخلوط سرفکتنت‌ها (برحسب اعشار)،  $\square_i$  و  $\square_j$  به ترتیب ضریب فعالیت سرفکتنت  $i$  و  $j$  در میسل مخلوط (بدون واحد)، و  $CMC_i$  و  $CMC_j$  به ترتیب غلظت بحرانی میسل سرفکتنت  $i$  و  $j$  (برحسب mM) است. برای تعیین مقدار ضرایب  $\square_i$  و  $\square_j$ ، نیاز به دانستن کمیت دو پارامتر دیگر موسوم به فراکسیون مولی سرفکتنت  $i$  ( $X_i$ ) و پارامتر برهم‌کنش (۲) بین سرفکتنت‌های  $i$  و  $j$  است، که می‌توان آن‌ها را از روابط زیر محاسبه نمود (۲۱ و ۱۱):

$$\frac{x_i^2 \times \ln \left( \frac{X_i \times CMC^*}{x_i \times CMC_i} \right)}{(1-x_i)^2 \times \ln \left( \frac{(1-X_i) \times CMC^*}{(1-x_i) \times CMC_j} \right)} = 1 \quad (۴)$$

$$\beta = \frac{\ln \left[ \frac{(X_i \times CMC^*)}{(x_i \times CMC_i)} \right]}{(1-x_i)^2} \quad (۵)$$

با حل معادله (۴) به روش سعی و خطا، و سپس برآورد پارامتر برهم‌کنش از معادله (۵)، می‌توان ضریب فعالیت را برای هر یک از سرفکتنت‌ها از روابط زیر به دست آورد (۲۲):

$$\gamma_i = \exp \beta (1-x_i)^2 \quad (۶)$$

$$\gamma_j = \exp \beta x_i^2 \quad (۷)$$

4. Kolmogorov-Smirnov Test

5. Friedman Test

1. Rubingh's Regular Solution Theory

2. Synergy

3. Antagonism

هوا، همانند یک "شیر کاملاً باز" عمل می‌کنند. به عبارت دیگر، قطره‌چکان‌های نزدیک به ونتوری بخش اعظم هوایی که در دست‌رس‌شان است را (به خارج) تخلیه می‌کنند به نحوی که هوای ناچیزی برای قطره‌چکان‌های پایین‌دست باقی می‌ماند. اگرچه ممکن است این امر با توجه به "جبران فشار" بودن نوع قطره‌چکان‌ها، بسیار عجیب به نظر برسد، اما می‌توان علت را با استناد به تفاوت فاحشی که بین سه خاصیت فیزیکی مهم آب و هوا وجود دارد، توضیح داد. در شرایط متعارف، چگالی، گران‌روی دینامیک و مدول کشسانی<sup>۱</sup> (شاخصی از تراکم‌پذیری سیالات) آب به ترتیب  $1000 \text{ kg m}^{-3}$ ،  $10^{-2} \text{ m}^{-1} \text{ s}^{-1}$  و  $2/19 \text{ GPa}$  است در حالی که همین پارامترها برای هوا به ترتیب  $1/29 \text{ kg m}^{-3}$ ،  $10^{-5} \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$  و  $10^{-4} \text{ GPa}$  گزارش شده‌اند (۲۷ و ۲۸). سبک‌تر بودن هوا نسبت به آب، باعث می‌شود که حباب‌های هوا همواره در بالاترین قسمت لوله (مجاور منفذ ورودی قطره‌چکان‌ها) جریان داشته باشند.

داده شده در جدول (۲)، با توجه به اینکه آماره محاسبه شده فریدمن (FR) از مقدار مندرج در جدول آزمون فریدمن با درجه آزادی ۵ و سطح احتمال ۰/۰۵ بزرگ‌تر است، می‌توان نتیجه گرفت که تفاوت معنی‌داری بین توزیع داده‌ها در تیمارهای مذکور وجود دارد. در فرازهای زیر، بررسی بیش‌تری راجع به علل این تفاوت انجام شده است. در شکل (۲)، چگونگی توزیع بده هوای خروجی از قطره‌چکان‌ها (در آب فاقد سرفکتانت) با در نظر گرفتن فاصله آن‌ها نسبت به منبع تزریق هوا (ونتوری) نشان داده شده است. از شکل مذکور به روشنی دیده می‌شود که از فاصله ۲ متری (یعنی، محل نصب اولین قطره‌چکان) تا ۸ متری نسبت به محل نصب ونتوری، دبی هوای قطره‌چکان‌ها با شیب تندی از حدود ۹/۸ لیتر در ساعت به ۰/۸ لیتر در ساعت کاهش و سپس از فاصله ۱۱ متری نسبت به ونتوری، دبی هوای قطره‌چکان‌ها تقریباً به سمت صفر میل می‌کند. مقدار CUC محاسبه‌شده در این آزمایش ۶۷- درصد بود که حاکی از غیریکنواختی شدید توزیع بده هوا در امتداد لوله آبدار دارد. به نظر می‌رسد که قطره‌چکان‌ها در مواجهه با حباب‌های

جدول (۱) - فراکسیون‌های مولی، وزن هر سرفکتانت، و کمیت CMC\* در میسل مخلوط

CMC*(mM)	وزن سرفکتانت <sup>۱</sup> (g)	X <sub>TX-100</sub>
۰/۰۱۱ <sup>۲</sup>	۰ (۱/۴۴)	۰
۰/۰۱۳۸ <sup>۳</sup>	۱۰/۷۷ (۰/۴۸)	۰/۳۳
۰/۰۱۵۱ <sup>۳</sup>	۸/۰۸ (۰/۷۲)	۰/۵
۰/۰۲۸۳ <sup>۳</sup>	۵/۳۸ (۰/۹۶)	۰/۶۷
۰/۲۵ <sup>۴</sup>	۱۶/۱۵ (۰)	۱

<sup>۱</sup>: اعداد داخل پرانتز، وزن سرفکتانت توئین ۸۰ و اعداد خارج از پرانتز، وزن سرفکتانت تریتون ایکس-۱۰۰ مصرف‌شده در هر آزمایش (برای ۱۰۰ لیتر آب) را نشان می‌دهند.

<sup>۲</sup>: برگرفته از لیو و همکاران (۱۸).

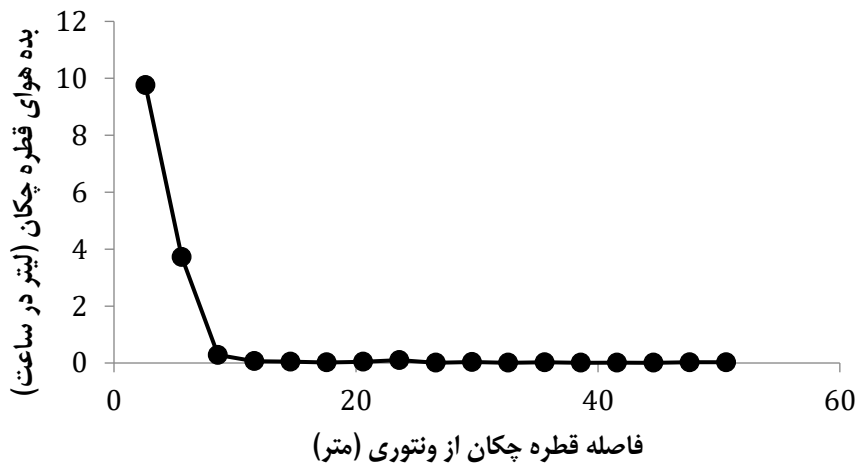
<sup>۳</sup>: برگرفته از مولیک و گاش (۲۶).<sup>۴</sup>: برگرفته از حق و همکاران (۱۷).

جدول ۲- نتایج آزمون فریدمن برای بده هوای خروجی از قطره‌چکان‌ها در تیمارهای آزمایش

تیمار						
X <sub>1</sub>	X <sub>0.67</sub>	X <sub>0.5</sub>	X <sub>0.33</sub>	X <sub>0</sub>	X <sub>c</sub>	
۰/۶۳۰	۰/۶۱۰	۰/۶۴۰	۰/۶۱۰	۰/۵۵۶	۰/۰۲۸	میانه (L h <sup>-1</sup> )
۰/۲۰۸	۰/۲۰۵	۰/۲۱۰	۰/۲۱۶	۰/۳۹۱	۲/۴۶۷	انحراف معیار (L h <sup>-1</sup> )
			۲۵/۸۵۷			FR محاسبه شده
			۱۱/۰۷۰			FR <sub>5,0.05</sub> (از جدول)

## 1. Modulus of Elasticity



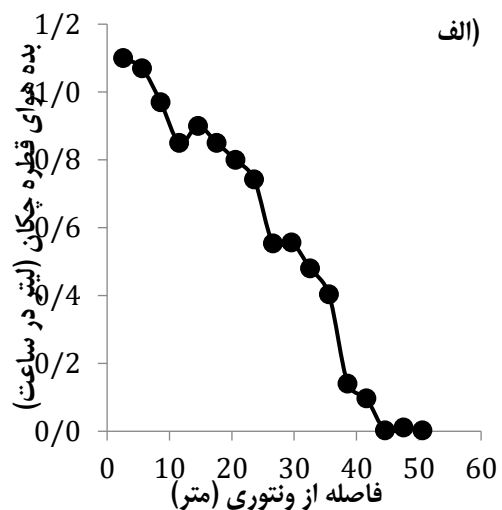
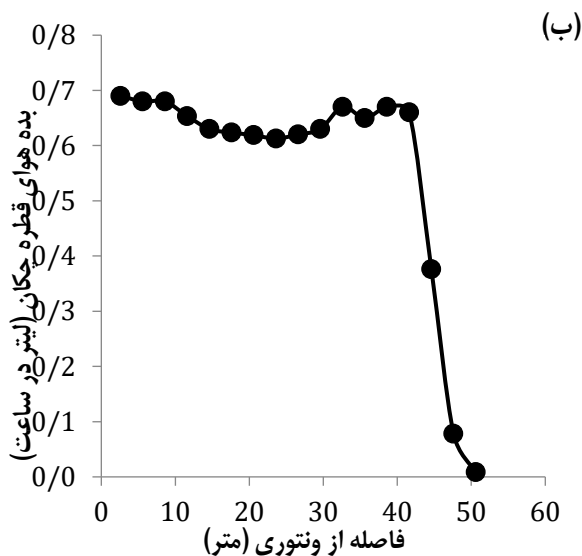


شکل ۲- توزیع هوای خروجی از قطره‌چکان‌ها در شرایط عدم وجود سرفکتانت در آب آبیاری

CUC در شرایط اضافه شدن ترایتون ایکس-۱۰۰ و توئین ۸۰، به ترتیب ۷۴ و ۴۱ درصد محاسبه شد. بدون شک، عملکرد ترایتون ایکس-۱۰۰ در بهبود یکنواختی توزیع هوای قطره‌چکان‌ها به مراتب بهتر از توئین ۸۰ بوده است. این مطلب را می‌توان به خوبی با مقایسه شکل‌های یاد شده نیز دریافت. در شکل (۳-الف)، تا فاصله ۴۲ متری از ونتوری، دبی هوای قطره‌چکان‌ها نسبتاً ثابت مانده است (تقریباً  $L_h$  <sup>1</sup> /۶۵) و از این فاصله به بعد، با شیب تندی به سمت صفر میل می‌کند. به عبارت دیگر، وجود سرفکتانت ترایتون ایکس-۱۰۰ در این آزمایش باعث شد دبی هوای خروجی از قطره‌چکان‌ها در امتداد ۸۰ درصد از کل طول لوله آبدۀ نسبتاً ثابت و یکنواخت باقی بماند. الگوی توزیع بده هوای قطره‌چکان‌ها در شرایط اضافه شدن سرفکتانت توئین ۸۰ (شکل ۳-ب) کاملاً با الگوی حاصل از ترایتون ایکس-۱۰۰ (شکل ۳-الف) متفاوت می‌باشد. در شکل (۳-ب)، بده هوای قطره‌چکان‌ها با شیبی ثابت و یکنواخت تا فاصله ۴۲ متری نسبت به ونتوری (۸۰ درصد از کل طول لوله آبدۀ) به تدریج کاهش می‌یابد و سپس تا انتهای لوله آبدۀ مقدار بده قطره‌چکان‌ها به سمت صفر میل می‌کند.

در نتیجه، قطره‌چکان‌های مستقر در بالادست لوله آبدۀ در مقایسه با آن‌هایی که در پایین دست قرار گرفته‌اند، دسترسی بیش‌تری به حباب‌های هوا داشته باشند. از سوی دیگر، گرانروی هوا بسیار کم‌تر از آب است. این امر باعث می‌شود که فن‌آوری "جبران فشار" قطره‌چکان‌ها در مورد حباب‌های هوا تأثیر چندانی نداشته باشد و همان‌گونه که قبلاً گفته شد مانند "شیر کاملاً باز" عمل کنند. علاوه بر این‌ها، تراکم‌پذیری بسیار زیاد هوا (در مقایسه با آب، که تقریباً غیر قابل تراکم محسوب می‌شود) این امکان را به وجود می‌آورد که حتی حباب‌های نسبتاً بزرگ هوا نیز بتوانند به راحتی از منافذ بسیار ریز قطره‌چکان‌ها عبور کنند. در پژوهشی که توسط باترای و همکاران (۲۹) راجع به توزیع قطر حباب‌های هوا در سامانه‌های اکسیژن-آبیاری انجام شد، صریحاً به روند نزولی توزیع بده هوای خروجی از قطره‌چکان‌ها در امتداد لوله آبیاری اشاره شده است.

در شکل‌های شماره (۳-الف) و (۳-ب)، به ترتیب تأثیر اضافه شدن سرفکتانت ترایتون ایکس-۱۰۰ و توئین ۸۰ به آب آبیاری در بهبود یکنواختی توزیع بده هوای قطره‌چکان‌ها نشان داده شده است. مقدار



شکل ۳- توزیع هوای خروجی از قطره‌چکان‌ها در شرایطی که به آب آبیاری ترایتون ایکس-۱۰۰ (شکل ۳-الف) یا توئین ۸۰ (شکل ۳-ب) اضافه شده بود.

حباب‌های هوا غالباً در بخش فوقانی لوله آبیاری حرکت می‌کنند (۳۸). بر خلاف حالت مذکور، افزودن سرفکتانت به آب موجب کوچک‌تر شدن قطر حباب‌های هوا، ممانعت از ادغام آن‌ها در یکدیگر، کاهش سرعت صعود حباب‌های هوا و در نتیجه توزیع یکنواخت‌تر آن‌ها در مقطع عرضی لوله می‌شود (۳۹). بدین ترتیب، توزیع یکنواخت‌تر حباب‌های هوا در مقطع عرضی لوله از یک طرف باعث کاهش بده هوای قطره‌چکان‌های مستقر در ابتدای لوله آبد، و از سوی دیگر موجبات فراهم شدن دسترسی بیشتر تر قطره‌چکان‌های نصب‌شده در قسمت‌های انتهایی لوله آبیاری به حباب‌های هوا می‌شود.

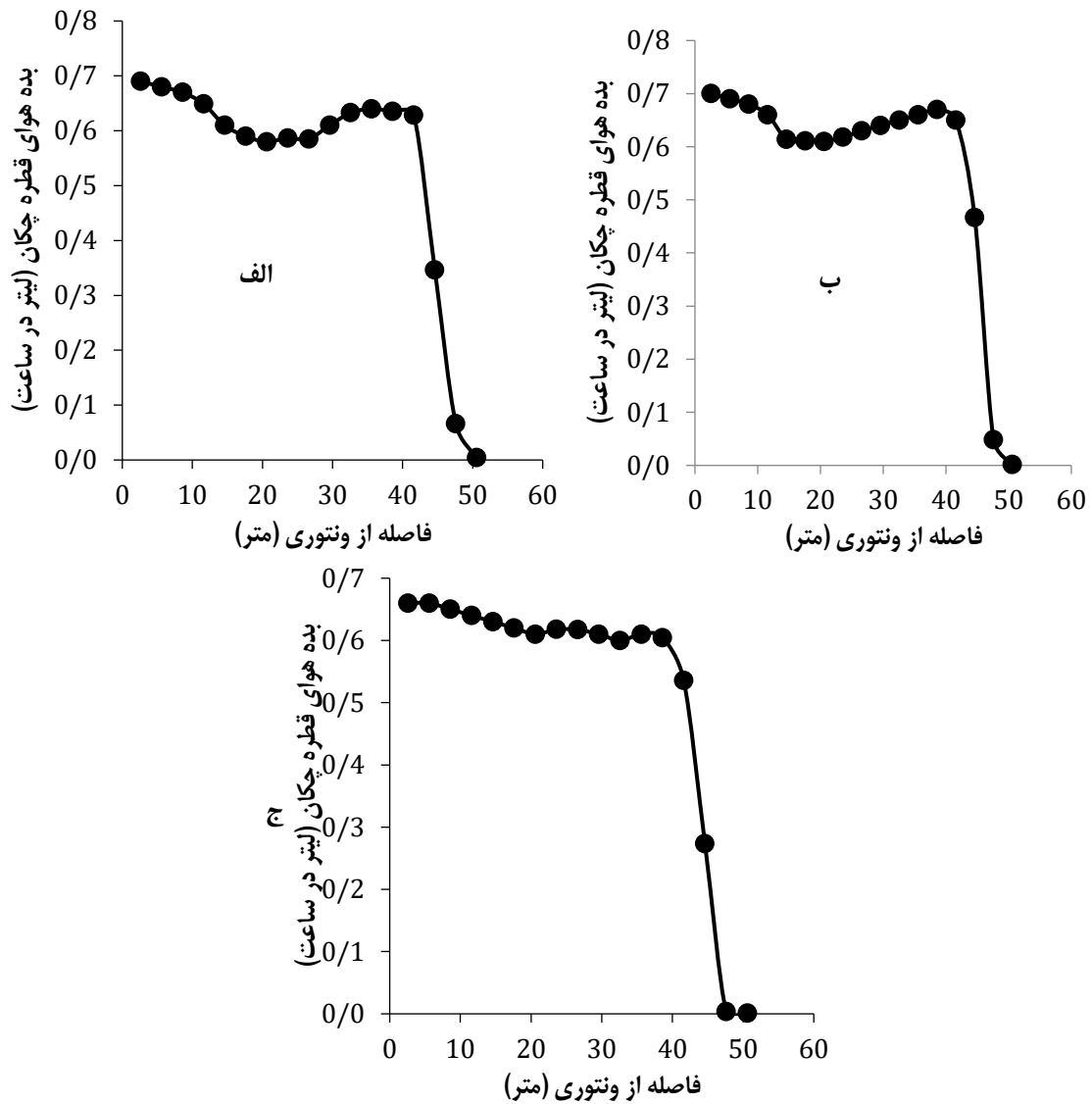
شکل‌های (۴-الف)، (۴-ب) و (۴-ج) توزیع بده هوای قطره‌چکان‌ها را در شرایطی که نسبت‌های مختلفی از مخلوط دو سرفکتانت ترایتون ایکس-۱۰۰ و توئین ۸۰ به آب آبیاری اضافه شده بود، نشان می‌دهند. در هر سه حالت، الگوی توزیع بده هوای قطره‌چکان‌ها شباهت زیادی را با شکل (۳-الف)، یعنی حالتی که فقط از سرفکتانت ترایتون ایکس-۱۰۰ استفاده شده بود، نشان می‌دهند. برای تحلیل این نتایج، به اطلاعات مندرج در جدول (۱) و (۳) که با استفاده از معادلات (۲) تا (۹) و نیز قیمت سرفکتانت‌ها (ترایتون ایکس-۱۰۰ و توئین ۸۰ به ترتیب، هرکیلوگرم ۹۸۰۰۰۰ و ۱۱۲۰۰۰۰ ریال) به دست آمده‌اند، استناد می‌گردد. در جدول (۳)، پارامترهای مندرج در ستون‌های ۱ تا ۱۰ به ترتیب، فراکسیون مولی سرفکتانت ترایتون ایکس-۱۰۰ در مخلوط آبی، مقدار محاسبه شده GMC مخلوط از معادله کلینت، فراکسیون مولی سرفکتانت ترایتون ایکس-۱۰۰ محاسبه شده از معادله (۴)، فراکسیون مولی سرفکتانت مذکور محاسبه شده از معادله (۹)، پارامتر برهم‌کنش، ضریب فعالیت سرفکتانت ترایتون ایکس-۱۰۰، ضریب فعالیت سرفکتانت توئین ۸۰، متوسط بده هوای خروجی از قطره‌چکان‌ها، ضریب یکنواختی توزیع کریستیانسن، و بهای سرفکتانت (یا سرفکتانت‌های) مصرفی در ۱۰۰ لیتر آب می‌باشند.

از مقایسه مقادیر GMC اندازه‌گیری شده (جدول ۱، ستون سوم) برای فراکسیون‌های مولی ۰/۳۳، ۰/۵ و ۰/۶۷ با مقادیر متناظر محاسبه‌شده از معادله کلینت (جدول ۳، ستون دوم) و وجود تفاوت بین آن‌ها، مشخص می‌شود که رفتار مخلوط سرفکتانت‌ها آرمانی نبوده است. همین نتیجه‌گیری، در مورد تفاوت بین مقادیری که با دو فرض متفاوت برای فراکسیون‌های مولی ترایتون ایکس-۱۰۰ در مخلوط میسل محاسبه‌شده‌اند (ستون‌های سوم و چهارم)، صادق است. علامت پارامتر برهم‌کنش (۲) در تمام موارد، منفی است که حاکی از وجود برهم‌افزایی در رفتارهای دو سرفکتانت دارد. البته، باید به این نکته اشاره نمود که کوچک بودن قدر مطلق (۲) نشانه وجود برهم‌افزایی ضعیف است.

مقایسه ضرایب فعالیت سرفکتانت‌ها در مخلوط میسل (جدول ۳، ستون‌های ششم و هفتم) به روشنی نشان می‌دهد که برخلاف سرفکتانت ترایتون ایکس-۱۰۰، مقادیر (۲) برای سرفکتانت توئین ۸۰ همواره به عدد ۱ (رفتار آرمانی) بسیار نزدیک بوده است. به همین دلیل است که مقدار یکنواختی توزیع بده هوای قطره‌چکان‌ها (جدول ۳، ستون نهم) در زمانی که از ترایتون ایکس-۱۰۰ به تنهایی یا در مخلوط

به طور کلی، سرفکتانت‌ها از سه طریق باعث بهبود یکنواختی توزیع بده هوای قطره‌چکان‌ها می‌شوند: کاهش کشش سطحی آب، کاهش قطر حباب‌های هوا و ممانعت از ادغام آن‌ها در یکدیگر، و کاهش سرعت صعود حباب‌های هوا و توزیع یکنواخت‌تر حباب‌های هوا در مقطع عرضی لوله آبد. زمانی که سرفکتانت‌ها به مخلوط آب و هوا اضافه می‌شوند، مولکول‌های این مواد تمایل به تجمع در سطح حباب‌های هوا دارند و باعث بروز تغییراتی در فصل مشترک آب و هوا می‌شوند (۳۰). در حقیقت، جزء آب‌گریز سرفکتانت از طریق شکستن پیوندهای هیدروژنی موجود در مولکول‌های آب و تشکیل ساختار مولکولی جدید، اختلالاتی را در ساختار مولکولی آب ایجاد می‌کنند. در نتیجه این به هم‌ریختگی، برخی از مولکول‌های سرفکتانت به سوی فصل مشترک آب و هوا رانده می‌شوند در حالی که آرایش اجزاء آب‌گریز به نحوی سازمان‌دهی شده است که تماس‌شان با مولکول‌های آب به حداقل برسد. در این هنگام، سطح آب از یک لایه مولکول سرفکتانت به‌گونه‌ای پوشیده می‌شود که جزء آب‌گریز آن‌ها عمدتاً به طرف خارج آب (یعنی به سمت هوا) قرار می‌گیرد. چون مولکول‌های هوا اساساً ماهیتی غیرقطبی دارند (همچنان که جزء آب‌گریز سرفکتانت هم ماهیتی غیرقطبی دارد)، این کاهش ناهمسانی در ویژگی‌های آب و هوا در ناحیه فصل مشترکشان، منجر به کاهش کشش سطحی آب می‌گردد (۳۱). از سوی دیگر، با کاهش کشش سطحی آب، قطر حباب‌های هوا هم متناسب با آن کوچک‌تر خواهد شد و این امر از ادغام حباب‌های کوچک در یکدیگر جلوگیری خواهد کرد (۳۲ و ۳۳). با توجه به ثابت بودن بده تزریق هوا به سامانه آبیاری و استناد به قانون بقای جرم، افزودن سرفکتانت به آب منجر به کاهش قطر حباب‌های هوا و در نتیجه افزایش تعداد آن‌ها می‌شود (۳۴). این امر باعث می‌گردد که حباب‌های هوا بتوانند مسافت بیشتری را در طول لوله آبیاری طی نمایند و در نتیجه با افزایش دسترسی قطره‌چکان‌های واقع در انتهای لوله به هوا، مقدار CUC بده هوای قطره‌چکان‌ها افزایش یابد. شاید بتوان تفاوت عملکرد این دو نوع سرفکتانت در بهبود CUC بده هوای قطره‌چکان‌ها را به تفاوت در توانایی آن‌ها در کاهش کشش سطحی آب، که اصطلاحاً به فشار سطحی<sup>۲</sup> موسوم است، ربط داد. مقدار کاهش کشش سطحی آب ناشی از افزودن سرفکتانت ترایتون ایکس-۱۰۰ معادل  $1 \text{ mN m}^{-1}$  و در مورد توئین ۸۰ به میزان  $18/8 \text{ mN m}^{-1}$  گزارش شده است (۳۵ و ۳۶). بدین ترتیب، کاهش بیش‌تر کشش سطحی آب توسط ترایتون ایکس-۱۰۰ در مقایسه با توئین ۸۰، باعث می‌شود که قطر حباب‌های هوا ریزتر و تعداد آن‌ها بیش‌تر شود که نتیجه این امر، افزایش بیش‌تر CUC بده هوای قطره‌چکان‌ها می‌باشد.

یکی دیگر از پی‌آمدهای اضافه شدن سرفکتانت به آب، کاهش قابل ملاحظه سرعت صعود حباب‌های هوا می‌باشد (۳۷). شدت این تأثیرات بستگی به غلظت و نوع سرفکتانت دارد. در آب عاری از سرفکتانت، امکان این که حباب‌های هوا به علت تصادم با یکدیگر، در هم ادغام شوند و حباب‌هایی با قطر بزرگ‌تر به وجود آورند، زیاد است. با افزایش قطر حباب‌ها، سرعت صعود آن‌ها نیز افزایش می‌یابد و در نتیجه، توده



شکل ۴- تاثیر افزودن مخلوطی از سرفکتانت‌های ترایتون ایکس-۱۰۰ و توئین ۸۰ بر توزیع هوای خروجی از قطره چکان‌ها در شرایط  $X_i=0/167$  (شکل ۴-الف)،  $X_i=0/50$  (شکل ۴-ب)، و  $X_i=0/333$  (شکل ۴-ج)

جدول ۳- اثرات ناشی از کاربرد انفرادی یا مخلوطی از سرفکتانت‌های ترایتون ایکس-۱۰۰ و توئین ۸۰ بر میانگین بده هوای قطره چکان‌ها، ضریب یکنواختی توزیع بده هوا و هزینه‌های حاصله

قیمت (ریال)	CUC (%)	Mean q (L h <sup>-1</sup> )	$\sigma_j$	$\sigma_i$	$\sigma$	$X_i^{id}$	$X_i$	CMC* <sup>†</sup> (mM)	$X_i$
۱۸۷۲	۴۱/۳	۰/۵۶	-	-	-	-	-	-	۰
۷۴۳۵	۷۰/۹	۰/۵۳	۰/۹۶۰	۰/۱۴۴	-۲/۵۳۹	۰/۰۲	۰/۱۳	۰/۰۱۶۱	۰/۳۳
۱۰۲۲۸	۷۵/۵	۰/۵۶	۰/۸۷۱	۰/۱۴۲	-۳/۱۲۲	۰/۰۴	۰/۲۱	۰/۰۲۱	۰/۵
۱۳۰۱۰	۷۳/۸	۰/۵۴	۰/۹۸۵	۰/۵۴۴	-۰/۸۱۶	۰/۰۸	۰/۱۴	۰/۰۳۰۴	۰/۶۷
۱۸۵۷۲	۷۴/۴	۰/۵۶	-	-	-	-	-	-	۱

†: محاسبه شده از معادله (۸).

یکنواختی توزیع مشاهده شد. بدین نحو که افزودن سرفکتنت به آب منجر به کاهش کشش سطحی آب و در نتیجه افزایش تعداد حباب‌های هوا و متناسب با آن، کاهش قطر حباب‌های هوا شد. کاهش قطر حباب هوا باعث کاهش سطح مقطع حباب و در نتیجه کاهش سرعت صعود حباب هوا در لوله آبیاری می‌شود که به نوبه خود منجر به افزایش سطح اشغال شده توسط هوا (نسبت به سطح اشغال شده توسط آب) در مقطع عرضی لوله آبد می‌شود. بدین ترتیب، از یک طرف با افزایش تعداد حباب‌های هوا، میزان دست‌رسی قطره‌چکان‌های واقع در پایین دست لوله به هوا افزایش می‌یابد و از سوی دیگر، با افزایش نسبی حباب‌های هوا در مقطع عرضی لوله، دست‌رسی قطره‌چکان‌های واقع در بالادست لوله آبد به هوا کاهش می‌یابد. چنانچه اختلاط دو نوع سرفکتنت همراه با پدیده برهم‌افزایی باشد، قطعاً استفاده از آن‌ها در مقایسه با استفاده از فقط یک نوع سرفکتنت، کارایی و تأثیر بیشتری بر بهبود یکنواختی توزیع بده هوا خواهد داشت. در انتخاب سرفکتنت‌ها چند نکته مهم را باید مورد توجه قرار داد. اولاً، از سرفکتنت‌هایی استفاده شود که زیست تجزیه پذیر باشند، سمیت خیلی کم برای موجودات زنده داشته باشند، حلالیت آن‌ها در آب زیاد باشد، CMC آن‌ها خیلی کوچک باشد، و از نوع غیر یونی باشند تا تأثیری بر یون‌های غذایی موجود در کودهای شیمیایی حل شده در مخزن آب آبیاری نگذارند. ثانیاً، تأثیر برهم‌افزایی شدیدی داشته باشند (پارامتر  $\beta$  منفی و قدر مطلق آن عدد نسبتاً بزرگی باشد).

### مشارکت نویسندگان

طراحی و ایده پردازی، روش شناسی و تحلیل داده ها: مختار میران زاده؛ نظارت و نگارش نهایی: منوچهر ترایی

### تعارض منافع

بنابر اظهار نویسندگان مقاله حاضر فاقد هرگونه تعارض منافع بوده است.

### ملاحظات اخلاقی

#### پیروی از اصول اخلاق پژوهش

در مطالعه حاضر، فرم‌های رضایت نامه آگاهانه توسط تمامی آزمودنی‌ها تکمیل شد.

### حامی مالی

کلیه هزینه‌های مطالعه حاضر توسط سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی تامین شد.

سرفکتنت‌ها استفاده شده بود، بسیار بزرگ‌تر از موقعی است که فقط سرفکتنت توئین ۸۰ به آب آبیاری افزوده شده بود.

متوسط بده هوای قطره‌چکان‌ها (جدول ۳، ستون هشتم) تقریباً در همه شرایط ثابت بود ( $0.056 \text{ L h}^{-1}$ ). در مورد CUC نیز، به‌استثناء زمانی که فقط از توئین ۸۰ استفاده شده بود، در سایر موارد مقادیر محاسبه شده بسیار نزدیک به هم بودند و بین ۷۱ تا ۷۶ درصد نوسان داشتند. نکته قابل‌تأمل در تمام این آزمایش‌ها این است که اگرچه افزودن سرفکتنت به آب آبیاری باعث شد تا دست‌رسی قطره‌چکان‌هایی که در فاصله دورتری نسبت به ونتوری قرار داشتند، افزایش و در نتیجه CUC نیز بهبود یابد، اما به نظر می‌رسد تأثیر مثبت سرفکتنت در یکنواخت کردن توزیع بده هوای خروجی از قطره‌چکان‌ها، صرفاً محدود به تقریباً ۸۰ درصد از طول لوله آبد بوده است. با این حال، قضاوت قاطع و دقیق‌تر در این زمینه، منوط بر این خواهد بود که حجم هوای تزریقی به سامانه آبیاری، با استفاده از دستگاه‌های ویژه، به‌دقت اندازه‌گیری و سپس با بده هوای خروجی از قطره‌چکان‌ها در طول لوله آبد مقایسه شود.

بررسی هزینه سرفکتنت مصرف شده در هر آزمایش (ستون دهم) نشان می‌دهد که بیش‌ترین و کم‌ترین هزینه مربوط به مواقعی بوده است که فقط از یک نوع سرفکتنت استفاده شده بود. نکته جالب و قابل‌تأمل این است که اگرچه کم‌ترین هزینه مربوط به استفاده از توئین ۸۰ بوده است، اما همین سرفکتنت، کم‌ترین تأثیر را در بهبود CUC داشته است. از سوی دیگر، هرچند ترایتون ایکس-۱۰۰ با صرف بیش‌ترین هزینه، یکی از بهترین نتایج را در افزایش CUC حاصل نموده است، با این حال، نتایج جدول (۳) به روشنی نشان می‌دهد که می‌توان با صرف هزینه نسبتاً کم‌تر، تقریباً همان CUC را با مخلوطی از سرفکتنت‌ها نیز به دست آورد. به منظور پیش‌بینی میزان افزایش نسبی حاصله در CUC بده هوای قطره‌چکان‌ها به ازای کاربرد نسبت مشخصی از هر نوع سرفکتنت و تخمین هزینه مربوطه، از شکل (۵) می‌توان استفاده کرد. شکل مذکور براساس ارتباط بین فراکسیون مولی سرفکتنت ترایتون ایکس-۱۰۰ با بهای مخلوط سرفکتنت مصرفی در ۱۰۰ لیتر آب و افزایش نسبی CUC (نسبت به حالتی که از سرفکتنت استفاده نشود) ترسیم شده است. به‌عنوان مثال، از شکل (۵) می‌توان پیش‌بینی نمود که در فراکسیون مولی ۰/۱۷ (یعنی نسبت مولی ۰/۱۷ واحد ترایتون ایکس-۱۰۰ به ۰/۸۳ واحد توئین ۸۰) و صرف مجموعاً ۴۸۰۰ ریال هزینه بابت مصرف سرفکتنت‌های مذکور در ۱۰۰ لیتر آب، می‌توان انتظار داشت یکنواختی توزیع بده هوای قطره‌چکان‌ها به ۵۶ درصد بالغ شود (به عبارت دیگر، ۱۸۴ درصد افزایش نسبی در CUC). بدیهی است که نیل به CUC بالاتر (مثلاً ۷۱ تا ۷۶ درصد)، مستلزم صرف هزینه بیش‌تری خواهد بود.

### نتیجه‌گیری

در غیاب سرفکتنت، توزیع بده هوای قطره‌چکان‌ها به‌شدت غیریکنواخت است. اضافه شدن سرفکتنت به آب آبیاری تأثیر بسزایی در بهبود یکنواختی توزیع بده هوای قطره‌چکان‌ها دارد. نوع (یا به‌عبارت‌دیگر، ترکیب شیمیایی) سرفکتنت تأثیر فراوانی بر افزایش یکنواختی توزیع دارد. ارتباط مستقیمی بین مقدار کشش سطحی آب و

## References

- Sloan JJ, Engelke MC. Effect of ozonated water on creeping bentgrass growth in a sand medium. HortTechnology. 2005. 15 (1): 148-152. <https://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=US201300970238>
- Walter S, Heuberger H, Schnitzler WH. Sensibility of different vegetables to oxygen deficiency and aeration with H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> in the rhizosphere. In: Rahn C, Fink M. (eds). Acta Hort. 2004. 659: 499-508. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2004.659.66>
- Goorahoo D, Carstensen G, Zoldoske DF, Norum E, Mazzei A. Using air in subsurface drip irrigation (SDI) to increase yields in bell peppers. Int Water Irrigation. 2002. 22 (2): 39-42.
- Goorahoo D, Adhikari D, Zoldoske D, Mazzei A, Fanucchi R. Application of AirJection® irrigation to cropping systems in California. 2007. Accessed 20 Aug 2011. Available online at: <http://www.icwt.net/conference/Irrigation/Session%20E/Dave%20G.pdf>
- Torabi M, Midmore DJ, Walsh KB, Bhattarai SP, Tait L. Analysis of factors affecting the availability of air bubbles to subsurface drip irrigation emitters during oxygation. Irrigation Sci. 2013. 31 (4): 621-630. <https://doi.org/10.1007/s00271-012-0337-1>
- Torabi M, Midmore DJ, Walsh KB, Bhattarai SP. Improving the uniformity of air bubble delivery during oxygation. J Irrig Drain E-ASCE. 2014. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0000735](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000735)
- Maturi K, Reddy KR, Cameselle C. Surfactant-enhanced electrokinetic remediation of mixed contamination in low permeability soil. Sep Sci Technol. 2009. 44: 2385-2409. <https://doi.org/10.1080/01496390902983745>
- Patist A, Oh SG, Leung R, Shah D.O. Kinetics of micellization: its significance to technological processes. Colloid Surface A. 2001. 176: 3-16. [https://doi.org/10.1016/S0927-7757\(00\)00610-5](https://doi.org/10.1016/S0927-7757(00)00610-5)
- Mahmood ME, Al-Koofee DA. Effect of temperature changes on critical micelle concentration for Tween series surfactant. Glob J Sci Fron Res Chem B. 2013. 13 (4.1): 1-8. <https://journalofscience.org/index.php/GJSFR/article/view/816>
- Myers D. 2006. Surfactant Science and technology. 3rd ed. Wiley-Interscience, Hoboken, NJ. [DOI:10.1002/047174607X]
- Joshi T, Mata J, Bahadur P. Micellization and interaction of anionic and nonionic mixed surfactant systems in water. Colloid Surface A. 2005. 260: 209-215. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2005.03.009>
- Zhou W, Zhu L. Enhanced desorption of phenanthrene from contaminated soil using anionic/nonionic mixed surfactant. Environ Pollut. 2007. 147: 350-357. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2006.05.025>
- Howell TA. Irrigation efficiency. In: B.A. Stewart and A.T. Howell (eds.), Encyclopedia of Water Science. Marcel Dekker Inc., New York. 2003. pp. 467-472. <https://www.worldcat.org/title/encyclopedia-of-water-science/oclc/52757434>
- ASAE Standards. American Society of Agricultural Engineering, St. Joseph, MI. 1996. pp. 792 - 797. <https://www.ksre.k-state.edu/sdi/reports/1997/EvalMI.pdf>
- Sharma R, Shaheen A, Mahajan RK. Cyclic voltammetry and viscosity measurements of aggregated assemblies of anionic surfactants with nonionic surfactants and triblock copolymers. Colloid Polym Sci. 2011. 289: 43-51. <https://link.springer.com/article/10.1007/s00396-010-2323-6>
- Taha AA, Abdel Rahman HH, Abouzeid FM. Effect of surfactants on the rate of diffusion controlled anodic dissolution of copper in orthophosphoric acid. Int J Electrochem Sci. 2013. 8: 6744-6762.

- <https://1library.net/document/7qv7wglq-effect-surfactants-diffusion-controlled-anodic-dissolution-copper-orthophosphoric.html>
17. Haque ME, Das AR, Moulik SP. Behaviors of sodium deoxycholate (NaDC) and polyoxyethylenetert-octylphenyl ether (Triton X-100) at the air/water interface and in the bulk. *J Phys Chem.* 1995. 99 (38): 14032-14038.
  20. matics: Concepts and applications for the chemical and clinical laboratory technician. 2nd ed. Delmar Learning, New York, NY. 2003. [https://books.google.ca/books/about/Essential\\_Laboratory\\_Mathematics.html?id=FsKyEE8dJAgC&redir\\_esc=y](https://books.google.ca/books/about/Essential_Laboratory_Mathematics.html?id=FsKyEE8dJAgC&redir_esc=y)
  21. Vautier-Giongo C, Bakshi MS, Singh J, Ranganathan R, Hajdu J, Bales BL. Effects of interactions on the formation of mixed micelles of 1,2-diheptanoyl-sn-glycero-3-phosphocholine with sodium dodecyl sulfate and dodecyltrimethylammonium bromide. *J Colloid Interf Sci.* 1983. 282: 149-155. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/15576093/>
  22. Rubingh DN. Mixed micelle solutions. In: Mittal KL. (ed.), *Solution chemistry of surfactants*, vol. 1. Plenum Press, New York. 1979. pp. 337-354. [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-4615-7880-2\\_15](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-4615-7880-2_15)
  23. Nagarajan R. Molecular theory for mixed micelles. *Langmuir.* 1985. 1: 331-341. <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/la00063a012>
  24. Clint JH. Micellization of mixed nonionic surface active agents. *J Chem Soc Faraday T 1.* 1975. 71: 1327-1334. <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/1975/f1/f19757101327#!divAbstract>
  25. Motomura K, Aratono M. Mixed surfactant systems. In: Ogino K, Abe M. (eds.), *Surfactant science series 46*, Marcel Dekker, New York. 1993. pp. 99-144. <https://www.worldcat.org/title/mixed-surfactant-systems/oclc/26852498>
  26. Cirin DM, Posa MM, Krstonosic VS. Interactions between selected bile salts and Triton X-100 or sodium lauryl ether <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/j100038a039>
  18. Liu ZF, Zheng GM, Wang J, Zhong H, Ding Y, Yuan XZ. Effects of monorhamnolipid and Tween 80 on the degradation of phenol by *Candida tropicalis*. *Process Biochem.* 2010. 45: 806-809. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2010.01.014>
  19. Johnson CW, Timmons DL, Hall PE. Essential laboratory mathe sulfate. *Chem Cen J.* 2011. 5: 1-8. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3284442/>
  27. Moulik SP, Ghosh S. Surface chemical and micellization behaviours of binary and ternary mixtures of amphiphiles (Triton X-100, Tween-80 and CTAB) in aqueous medium. *J Mol Liq.* 1997. 72: 145-161. [https://doi.org/10.1016/S0167-7322\(97\)00036-6](https://doi.org/10.1016/S0167-7322(97)00036-6)
  28. Vallero D. *Fundamentals of air pollution*. Academic Press, Waltham, MA. 2014. <https://www.elsevier.com/books/fundamentals-of-air-pollution/vallero/978-0-12-401733-7>
  29. Knight RJ, Endres AL. An introduction to rock physics principles of near-surface geophysics. In: Butler DK. (ed.), *Near-surface geophysics, part 1: concepts and fundamentals*. Society of Exploration Geophysics, Tulsa, Okla. 2005. pp. 31-70. <https://pubs.geoscienceworld.org/books/book/2111/chapter/114879317/An-Introduction-to-Rock-Physics-Principles-for>
  30. Bhattarai SP, Balsys RJ, Wassink D, Midmore DJ, Torabi M. The total air budget in oxygenated water flowing in a drip tape irrigation pipe. *Int J Multiphas Flow.* 2013. 52: 121-130. <https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2013.01.004>
  31. Mulligan CN, Yong RN, Gibbs BF. Surfactant-enhanced remediation of contaminated soil: a review. *Eng Geol.* 2001. 60: 371-380. [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(00\)00117-4](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(00)00117-4)
  32. Rosen MJ, Kunjappu JT. *Surfactants and interfacial phenomena*. John Wiley and Sons, New Jersey. 2012. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9781118228920>

33. Lee J, Kentish SE, Ashokkumar M. The effect of surface-active solutes on bubble coalescence in the presence of ultrasound. *J Phys Chem B*. 2005. 109 (11): 5095-5099. <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/jp0476444>
34. Graebel WP. *Engineering Fluid Mechanics*. Taylor & Francis Publishers, New York. 2001. <https://doi.org/10.1201/9781315272337>
35. Rozenblit R, Gurevich M, Lengel Y, Hetsroni G. Flow patterns and heat transfer in vertical upward air-water flow with surfactant. *Int J Multiphas Flow*. 2006. 23: 889-901. <https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2006.03.003>
36. Singh A, Mishra VK, Patel SK, Sheikh S, Sahu K, Chourey NK. Effect of surfactant on two immiscible liquid by Mansingh survismeter. *Int J Pharm Life Sci*. 2010. 1 (3): 182-187. <http://www.ijplsjournal.com/issues%20PDF%20files/july2010/9..pdf>
37. Partap R, Swaroop N, Tyagi DK, Yadav OP. Calcium chloride influenced surface and bulk properties of Triton X-100 in aqueous medium. *Indian J Chem*. 2005. 44A: 719-722. <http://nopr.niscair.res.in/handle/123456789/18081>
38. Takagi S, Ogasawara T, Matsumoto Y. The effects of surfactant on the multiscale structure of bubbly flows. *Philos T R Soc A*. 2008. 366: 2117-2129. <https://doi.org/10.1098/rsta.2008.0023>
39. Sankey M, Yang Z, Gladden L, Johns ML, Lister D, Newling B. Sprite MRI of bubbly flow in a horizontal pipe. *J Magn Reso*. 2009. 199: 126-135. <https://doi.org/10.1016/j.jmr.2009.01.034>
40. McNulty AJ. Oxygen uptake in sewerage pipelines. 1986. Accessed 29 July 2015. Available online at: <http://people.eng.unimelb.edu.au/imarusic/proceedings/9/McNulty.pdf>