

## Ultrasonic Production of Plant Nutrients Mist to Use in Aeroponic Systems: Feasibility and Investigation of Some Effective Parameters

AMIR HOSSEIN MIRZABE<sup>1</sup>, ALI HAJIAHMAD<sup>1\*</sup>, ALI FADAVI<sup>2</sup>, SHAHIN RAFIEE<sup>1</sup>

1. Department of Mechanics of Biosystem Engineering, Faculty of Engineering & Technology, College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran

2. Department of Food Technology Engineering, College of Aboureyhan, University of Tehran, Tehran, Iran

### ABSTRACT

Common fog production methods in aeroponic systems have some the disadvantages and limitations. So, an initial study was carried out to assess the feasibility to use the fog production technology through ultrasound. The effect of four independent variables, namely, over piezoelectric fluid head at three levels of 20, 30 and 40 mm, three levels of reservoir dimensions, three levels of piezoelectric location at the bottom of the reservoir, and fertilizer concentration in solution at four levels of 0, 2.5, 5, and 7.5 g.L<sup>-1</sup> on fog production rate, electrical conductivity changes, and total dissolved solids as dependent variables were investigated. The effects of three variables of concentration, piezoelectric position and reservoir dimensions on the rate of fog production were significant at 1% probability level. Also, the effect of fluid head was significant at probability level of 5%. The results indicated that the water-soluble nutrients could be transported better by ultrasound at a certain range of soluble concentrations.

**Keywords:** Piezoelectric, fog production rate, electrical conductivity, total dissolved solids

## تولید مه مواد مغذی گیاه به روش فراصوت جهت به‌کارگیری در سامانه‌های هواکشت: امکان‌سنجی و بررسی برخی از عوامل مؤثر

امیرحسین میرزابه<sup>۱</sup>، علی حاجی احمد<sup>۱\*</sup>، علی فدوی<sup>۲</sup>، شاهین رفیعی<sup>۱</sup>

۱. گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده مهندسی و فناوری، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

۲. گروه مهندسی فناوری صنایع غذایی، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران، تهران، ایران  
(تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۰/۲۱ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۹/۲/۵ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۹/۲/۲۱)

### چکیده

روش‌های مرسوم تولید مه در سامانه‌های هوا کشت، معایب و محدودیت‌های چشمگیری دارند. بر این اساس، در راستای به‌کارگیری فناوری تولید مه به روش امواج فراصوت، امکان‌سنجی اولیه انجام گرفت. اثر چهار متغیر مستقل، یعنی ارتفاع مایع بالای پیژوالکتریک در سه سطح ۲۰، ۳۰ و ۴۰ میلی‌متر، ابعاد مخزن تولید مه در سه سطح، موقعیت قرارگیری پیژوالکتریک در کف مخزن در سه سطح، و غلظت کود در محلول در چهار سطح ۰، ۲/۵، ۵، و ۷/۵ گرم در لیتر، بر سه متغیر وابسته نرخ تولید مه، تغییرات رسانایی الکتریکی، و مجموع مواد جامد محلول بررسی شدند. اثر سه متغیر غلظت، موقعیت پیژوالکتریک، و ابعاد مخزن بر میزان نرخ تولید مه در سطح احتمال ۱٪ و اثر ارتفاع محلول در سطح احتمال ۵٪ معنی‌دار بودند. نتایج نشان می‌دهند که سامانه فراصوتی در دامنه خاصی از غلظت محلول، ماده‌مغذی محلول در آب را بهتر منتقل می‌کند.

**واژه‌های کلیدی:** پیژوالکتریک، نرخ تولید مه، رسانایی الکتریکی، مجموع مواد جامد محلول

### مقدمه

آب به‌عنوان مهم‌ترین رکن حیات بعد از هوا اصلی‌ترین عامل بقای گیاهان و حیوانات است. با توجه به این واقعیت که هیچ مایعی نمی‌تواند جایگزین آب گردد تردیدی باقی نمی‌ماند که بزرگ‌ترین چالش فراگیر نسل آینده کمبود آب بوده و عدم سرمایه‌گذاری جدی و اصولی بر روی آن تهدیدی برای ابقاء نسل بشر است (Jalilvand & Noori Hendi, 2010). در مناطق خشک و کم باران، آب به‌عنوان اصلی‌ترین عامل محدودکننده توسعه، پیشرفت و انجام فعالیت‌های انسانی مطرح است (Jalilvand & Noori, 2010). با توجه به کمبود بارش در دهه‌های اخیر از یک‌سو و تأثیر بخش کشاورزی به‌عنوان بزرگ‌ترین مصرف‌کننده آب از سوی دیگر، مدیریت و استفاده از روش‌های نوین کشت جهت کاهش مصرف آب در بخش کشاورزی ضروری به نظر می‌رسد.

کشت هیدروپونیک با قابلیت کیفیت و کمیت بالای تولید محصول، یکی از روش‌های کشت است که از سال‌ها قبل دانشمندان به اهمیت آن پی برده‌اند. در این تکنیک آب و مواد

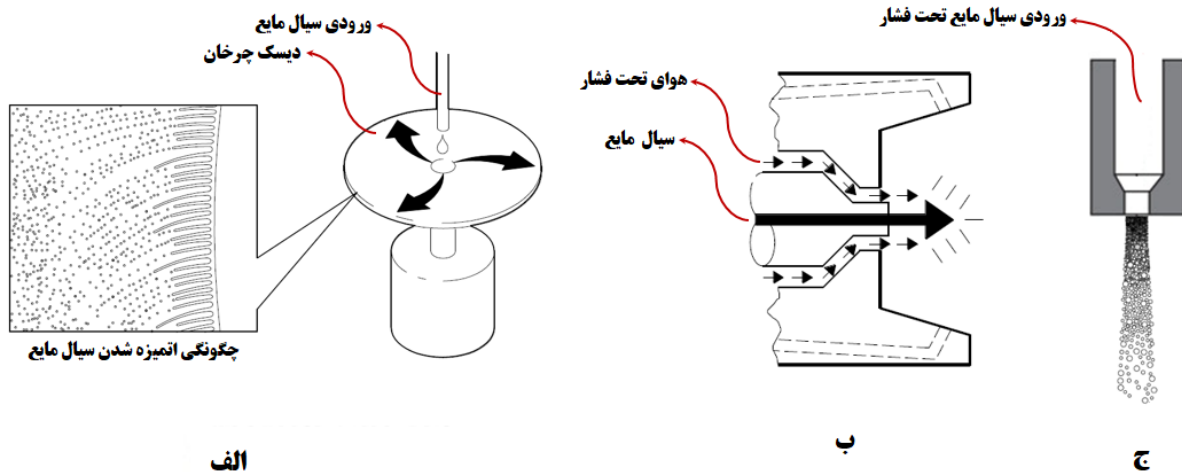
غذایی به میزان موردنیاز در اختیار گیاه قرار گرفته و از هدرروی، آلودگی و مسمومیت آب جلوگیری شده و درنهایت با صرف هزینه‌های کمتر تولید، بازدهی بیشتر اقتصادی حاصل می‌شود (Estaji, & Roosta, 2015). در روش هیدروپونیک، کلیه عوامل تأثیرگذار بر تولید تحت کنترل است. درحالی‌که در روش‌های معمول کشت در خاک، تعداد زیادی از پارامترهای خاک کنترل شده نیست و اطلاع از آن‌ها نیز بسیار دشوار یا غیرممکن است. واکنش‌های شیمیایی خاک، عملکرد میکروارگانیسم‌ها، وضعیت هوا، اکسیژن و دی‌اکسید کربن به‌طور کامل شناسایی نشده و رسیدن به تولید بیشینه میسر نیست. درحالی‌که در کشت هیدروپونیک، اجزای سیستم، قابل کنترل و قابل مدیریت بوده و رسیدن به تولید بهینه و حداکثری امکان‌پذیر است.

کشت هیدروپونیک دارای ۶ روش کلی شامل روش نوار غذایی (NFT)<sup>۱</sup>، شناوری، مویینگی، قطره‌ای، غوطه‌وری (DWC)<sup>۲</sup> و هواکشت است. یکی از روش‌های جدید کشت هیدروپونیک سیستم هواکشت است که در نوع خود مدرن‌ترین روش کشت محسوب می‌شود (Nugaliyadde et al., 2005). سیستم

\*نویسنده مسئول: hajiahmad@ut.ac.ir

شرایط کمبود و بحران آب، این فناوری کشور را قادر می‌سازد تا بذور و محصولات موردنیاز خود را سریع، در مقادیر زیاد، با قیمت مناسب و سلامت بالا تولید نماید. لذا این فناوری می‌تواند در تأمین پایدار محصولات کشاورزی موردنیاز از لحاظ اقتصادی و تأمین امنیت غذایی نقش به‌سزایی ایفا نماید (Hassanpanah, 2014).

بهبودسازی و افزایش عملکرد تولید گیاهان در سامانه‌های هواکشت از دو جنبه برای بهینه‌سازی (۱) رسیدن به پروتکل‌های مناسب رشد و (۲) تجهیزات کنترلی قابل بررسی است. از قسمت‌های اصلی در سامانه‌های هواکشت، سامانه تولید و انتقال مه به ریشه گیاه است. در حال حاضر، در سامانه‌های هواکشت، جهت تولید مه از سامانه‌های گریز از مرکز (معمولاً دیسک چرخان) و نازل‌های مه پاش استفاده می‌شود (Eknadiosyants, 1972; Topp & Eisenklam, 1970). نازل‌های مه پاش به دو روش قادر به تولید مه هستند. روش اول مایع تحت فشار از نازل خارج می‌شود. در روش دوم مایع تحت فشار نیست بلکه هوای تحت فشار از نازل خارج شده و باعث ایجاد فشار منفی در دهانه نازل شده و مایع را مکش می‌کند (شکل ۱).



شکل ۱- روش‌های مکانیکی تولید مه، الف) دیسک چرخان، ب) نازل مایع کم‌فشار و هوای تحت فشار، ج) مایع تحت فشار

پیدا کرده است (Firouz *et al.*, 2019).

بعد از مشاهدات انجام‌شده در مه‌سازی مایعات به‌وسیله امواج فراصوت (Wood & Loomis, 1927; Söllner, 1936)، تلاش‌های اولیه برای توضیح پدیده مه‌سازی انجام گرفت. مطابق با نتایج حاصل از مدل‌سازی، فرآیند مه‌سازی مایعات توسط امواج فراصوت، دو ایده کلی در مورد مکانیسم تولید قطرات مطرح گردید. (۱) عده‌ای از پژوهشگران عقیده دارند، امواج پراکنده‌شده توسط مبدل فراصوت باعث وقوع پدیده کاویتاسیون، مستقیماً در زیر سطح مایع گردیده و ترکیدن حباب‌ها، مومنتوم قطرات مایع

هواکشت، یکی از روش‌های کشت بدون خاک در محیط‌های رشد کنترل‌شده است. در این روش قسمت‌های زیرزمینی گیاه در داخل یک محفظه تاریک قرار داشته و توزیع آب و مواد غذایی به ریشه گیاه توسط یک مه پاش انجام می‌گیرد (Roosta *et al.*, 2013). علاوه بر کاهش مصرف آب، از مزایای سیستم هواکشت در مقایسه با سایر روش‌های سیستم‌های آب‌کشت و روش کشت رایج می‌توان به بهبود هوادهی اطراف ریشه‌ها (Soffer *et al.*, 1988)، افزایش محصول ناشی از رشد ریشه در هوا و بدون فشار مکانیکی (Gysi & Von Allmen, 1997)، بازیافت و استفاده مجدد از محلول غذایی و کنترل خوب ترکیب محلول غذایی و pH (Rezaei *et al.*, 2014) اشاره کرد. علاوه بر این، جلوگیری از بیماری‌های خاکزی (Lugt *et al.*, 1964)، مناسب بودن برای تولید عاری از ویروس بعضی از محصولات (Kang & Han, 2005)، افزایش سرعت رشد و تسریع فرایند تولید بذر سالم (Nichols & Christie, 2002)، برداشت راحت‌تر و تمیزتر بعضی از محصولات و امکان‌پذیری مدیریت اندازه محصول در برداشت‌های متوالی (Ritter *et al.*, 2001) از دیگر مزایای روش هواکشت هستند. با توجه به مزایای بیان‌شده برای سیستم هواکشت، در

یکی از روش‌های جدیدی که در سال‌های اخیر برای تولید مه مورد استفاده قرار گرفته است، استفاده از امواج مکانیکی فراصوت است. به امواج صوتی که دارای بسامدی بیشتر از بازه‌ی بسامدی شنوایی انسان (محدوده‌ی ۲۰ هرتز تا ۲۰ کیلوهرتز) هستند، امواج فراصوت گفته می‌شود. برای تولید امواج فراصوت به‌صورت مصنوعی روش‌های بسیاری وجود دارند. در تولید امواج مکانیکی با استفاده از الکتریسیته معمولاً از دو روش مغناطیسی یا خاصیت پیزو الکتریسیته استفاده می‌شود. در سال‌های اخیر، این فناوری کاربردهای زیادی در زمینه صنایع غذایی و کشاورزی

و کمیت جذب آب و مواد غذایی توسط گیاه داشته و در نهایت کیفیت و کمیت محصول تولیدی را تحت تاثیر قرار می‌دهد. با توجه به مزایای روش فراصوت در تولید مه نسبت به روش‌های متداول، امکان سنجی و بررسی پارامترهای موثر مه‌سازی به روش فراصوتی در سامانه‌های هواکشت ضروری به نظر می‌رسد. بررسی منابع نشان داد که تا کنون هیچ گونه پژوهشی در راستای مطالعه پارامترهای موثر بر نرخ تولید مه محلول‌های غذایی با رویکرد به کارگیری در سامانه‌های هواکشت، صورت نگرفته است. بدین منظور در این تحقیق مه‌سازی تیمارهای مختلف محلول آب مقطر و کود NPK با استفاده از امواج فراصوت از یک محرک پیزوالکتریک برنامه‌ریزی شد. چهار پارامتر: (۱) موقعیت پیزوالکتریک در مخزن، (۲) ارتفاع سیال بالای پیزوالکتریک، (۳) ابعاد محفظه تولید مه و (۴) غلظت کود شیمیایی در آب به‌عنوان متغیرهای مستقل و نرخ تولید مه، تغییرات مجموع مواد جامد محلول<sup>۱</sup> و رسانایی الکتریکی<sup>۲</sup> به‌عنوان متغیر وابسته در نظر گرفته شدند.

## مواد و روش‌ها

### آماده‌سازی محلول

برای بررسی قابلیت استفاده از مه ساز فراصوتی در سامانه‌های هواکشت، چهار تیمار غلظت برای مایع مغذی در نظر گرفته شد. تیمار اول مربوط به آب بدون وجود هیچ‌گونه افزودنی بود. سه تیمار دیگر از انحلال کود NPK-20-20-20 (یکی از رایج‌ترین کودهای شیمیایی مورد استفاده در انواع روش‌های کشت هیدروپونیک با قابلیت انحلال‌پذیری ۱۰۰٪) ساخت شرکت Mugavero ایتالیا به دست آمدند (جدول ۱). غلظت‌های مورد استفاده ۲/۵، ۵ و ۷/۵ گرم در لیتر بودند. به‌منظور اطمینان از یکسان بودن نمونه‌ها برای هر تیمار غلظت، مقدار مورد نیاز از هر تیمار غلظت برای انجام کل آزمایش‌ها با توجه به حجم مخزن محاسبه و تهیه شد. پس از آماده کردن مقدار مورد نیاز از هر تیمار غلظت و قبل از قرارگیری در معرض کارکرد پیزوالکتریک، مقدار TDS و EC اولیه هر یک از تیمارها اندازه‌گیری شد.

جدول ۱- ترکیب کود شیمیایی NPK-20-20-20 ساخت شرکت Mugavero ایتالیا

ماده شیمیایی	فرمول شیمیایی	درصد
نیتروژن به فرم آمونیوم	N-NH <sub>4</sub>	۳/۹
نیتروژن به فرم نترات	N-NO <sub>2</sub>	۳/۶
نیتروژن به فرم اوره	N-NH <sub>2</sub>	۱۲/۵
فسفر قابل استفاده	P <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۲۰
پتاسیم محلول در آب	K <sub>2</sub> O	۲۰

را به حدی بالا برده که با غلبه بر نیروی کشش سطحی و گرانش از سطح مایع جدا شده و منجر به تشکیل مه می‌گردند (Simon *et al.*, 2015). ۲) عده‌ای دیگر معتقدند که ناپایداری‌های موجود در امواج سطحی عامل ایجاد امواج کاپیلاری در سطح مایعات شده و منجر به فرآیند مه‌سازی می‌گردد (Rooney, 1981). برای سال‌های زیادی این دو تئوری مبنای توضیح علت وقوع پدیده متمیزه شدن ذرات مایع در اثر امواج فراصوت بود. اگرچه نتایج مه‌سازی با تلفیق این دو تئوری با عنوان "تئوری پیوستگی" توسط دیگران نیز مطرح شده است (Boguslavskii & Éknadiosyants, 1969). نتایج تحقیقات انجام‌شده نشان دادند که فرآیند مه‌سازی مایعات توسط امواج فراصوت، ترکیبی از هر دو تئوری مطرح شده می‌باشد و برهم‌کنش امواج کاپیلاری و تنش اعمالی از طرف کاپیتاسیون مایع، منجر به تشکیل قطرات مایع می‌گردند (Topp, 1969; Chiba, 1975; Boguslavski, 1973).

از یک‌سو، روش متمیزه کردن مایع مغذی تأثیر قابل توجهی در اندازه‌ی ذرات تولیدشده دارد و از سوی دیگر، اندازه‌ی نسبی قطرات تولیدشده تأثیر بسزایی در درصد جذب مواد غذایی توسط نمونه‌ها دارد. اندازه‌ی نسبی ذرات مه تولیدی توسط مکانیسم فراصوت در مقایسه با مکانیسم‌های دیگر کوچک‌تر و دارای توزیع اندازه یکنواخت‌تری است که تحت این شرایط جذب آن‌ها توسط بافت گیاهی آسان‌تر می‌گردد. همچنین روش‌های متداول تولید مه در سامانه‌های هوا کشت دارای معایبی از قبیل ایجاد تنش برشی بر روی ریشه گیاه در اثر دمش هوا درون سیستم، مسدود شدن نازل‌های مه پاش در اثر تماس مداوم با نمک‌های محلول در مواد غذایی و نیاز به استفاده از تجهیزات اضافی به‌منظور بازیافت مه پس از میعان بر روی ریشه گیاه هستند.

با توجه به موارد گفته شده، تامین امنیت غذایی کشور از یک‌سو و کمبود بارش در سال‌های اخیر از سوی دیگر، ایجاب می‌کند که در بخش کشاورزی سرمایه‌گذاری بیشتری بر روی توسعه سیستم‌های نوین پرورش گیاهان صورت گیرد. کشت هواکشت از روش‌های نوین کشت و دارای مزایای زیادی نسبت به روش‌های متداول کشت است. از قسمت‌های اصلی سامانه‌های هواکشت، سامانه تولید مه است که تأثیر قابل توجهی بر کیفیت

سامانه تولید مه

برای نصب پیزوالکتریک در کف مخزن از ورق آکرلیک (پلی متیل متاکریلات) به ضخامت ۶ میلی‌متر در قسمت فوقانی و ورق PVC به ضخامت ۱۶ میلی‌متر در قسمت تحتانی پیزوالکتریک استفاده شد. به‌منظور قرارگیری مطلوب و جلوگیری از لقی احتمالی، ورق آکرلیک و PVC با دستگاه برش لیزر و متناسب با ابعاد مقطع مخزن بریده شدند. همچنین بر روی ورق آکرلیک سه سوراخ با قطر ۱۸ میلی‌متر توسط برش لیزر ایجاد شد تا پیزوالکتریک‌ها از طریق این سوراخ‌ها با مایع (محلول آب مقطر و کود شیمیایی با غلظت‌های متفاوت) در تماس قرار گیرند. به‌علاوه، به ازای هر پیزوالکتریک، توسط برش لیزر سه عدد جای پیچ بر روی ورق آکرلیک با زاویه ۱۲۰° نسبت به یکدیگر ایجاد شد تا دو ورق آکرلیک و PVC توسط پیچ‌ها به یکدیگر محکم شوند. به‌منظور یکنواخت بودن اثر ارتعاش پیزوالکتریک‌ها، برای بستن پیچ‌های محکم کننده ورق آکرلیک به PVC از پیچ‌گوشتی Trotec-PSCS10 مجهز به کنترل گشتاور استفاده گردید. سه ورق آکرلیک برش خورده در شکل ۲ نشان داده شده‌اند.

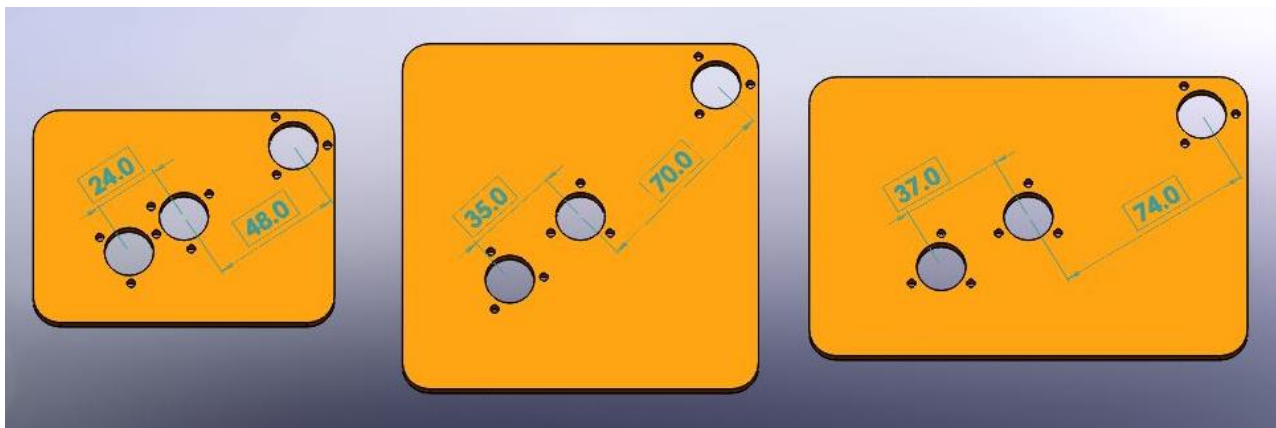
جدول ۲- ابعاد مخازن مورد استفاده و فاصله قطری مرکز پیزوالکتریک

نسبت به مرکز مخزن برای دو موقعیت گوشه و میانی

مخزن شماره	مخزن شماره	مخزن شماره	
۱	۲	۳	
۱۱۰	۱۶۰	۱۳۰	طول (mm)
۸۰	۱۰۵	۱۳۰	عرض (mm)
۱۰۰	۸۰	۸۰	ارتفاع (mm)
			فاصله موقعیت گوشه
۴۸	۷۴	۷۰	نسبت به مرکز مخزن (mm)
			فاصله موقعیت میانی
۲۴	۳۷	۳۵	نسبت به مرکز مخزن (mm)

اعمال فشار به برخی از کریستال‌ها مانند کوارتز، که مرکز تقارن ندارند، باعث تولید الکتریسیته می‌شود. این فرآیند در اثر جابجا شدن دوقطبی‌های ایجادشده در کریستال و پدید آمدن میدان الکتریکی رخ می‌دهد. عکس این فرآیند نیز در مواد پیزوالکتریک رخ می‌دهد؛ یعنی با اعمال جریان الکتریسیته به این‌گونه مواد، می‌توان باعث ایجاد تنش و فشار و در نتیجه ایجاد ارتعاش و نوسان در آن‌ها شد. نوسان با دامنه بسیار کم و بسامد بسیار زیاد می‌تواند اثرات موضعی شدیدی ایجاد کند که از این اثرات ایجادشده می‌توان برای کاربردهای مختلف استفاده کرد. برای تولید مه از پیزوالکتریک‌های سرامیکی با قطر ۲۰ و ضخامت ۱ میلی‌متر استفاده شد. برای راه‌اندازی پیزوالکتریک، یک مدار الکتریکی با خروجی فرکانس ۱/۱۲ مگاهرتز و ولتاژ ۳۰ ولت طراحی و ساخته شد. در آزمایش‌های انجام‌شده، نه عدد پیزوالکتریک در کف سه مخزن با ابعاد متفاوت قرار داده شد (شکل ۲). به‌منظور بررسی موقعیت پیزوالکتریک در نرخ مه تولیدی و نیز جلوگیری از ایجاد خطا در اثر باز و بسته کردن اجزای سامانه، سه عدد پیزوالکتریک در کف هر مخزن نصب شد. سه موقعیت گوشه، مرکز و میانی برای پیزوالکتریک‌های هر مخزن در نظر گرفته شد. ابعاد سه مخزن مورد استفاده و موقعیت پیزوالکتریک‌ها نسبت به مرکز مخزن در جدول ۱ ذکر شده است.

لازم به ذکر است که در موقعیت مرکزی، مرکز پیزوالکتریک دقیقاً در مرکز مخزن قرار گرفت. موقعیت گوشه و میانی، هر دو بر روی یک قطر مخزن قرار داشتند. موقعیت گوشه به‌گونه‌ای در نظر گرفته شد که مرکز آن دورترین فاصله ممکن با مرکز مخزن را داشته باشد. مرکز موقعیت میانی دقیقاً بر نقطه میانی بین مرکز مخزن و مرکز موقعیت گوشه در نظر گرفته شد.



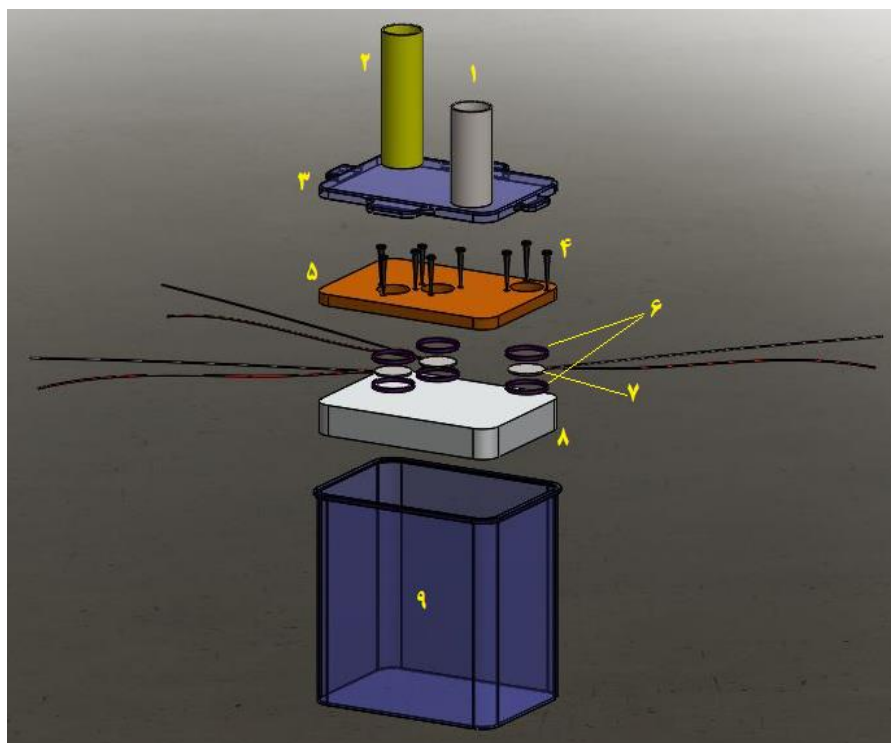
شکل ۲- سه ورق آکرلیکی برش خورده توسط لیزر جهت حذف درجات آزادی سرامیک پیزوالکتریک

آزادی آن انجام گرفت. با توجه به اتصال صلب پیزوالکتریک به دو ورق آکرلیک و PVC به‌عنوان تکیه‌گاه از یک‌سو، و جرم قابل

استفاده از ورق آکرلیک و PVC در نصب پیزوالکتریک با هدف ثابت کردن پیزوالکتریک در جای خود و حذف درجات

استفاده گردید. پیزوالکتریک بین دو واشر در بالا و پایین خود و واشرها به نوبه خود بین ورق آکرلیک و PVC قرار گرفتند. همچنین دو رشته سیم خروجی از پیزوالکتریک از بین دو ورق عبور داده شده و با ایجاد سوراخ ریزی در قسمت فوقانی مخزن به مدار الکتریکی مربوطه متصل گردیدند.

ملاحظه مجموعه مخزن و تکیه‌گاه‌ها از سوی دیگر، از انتقال مؤثر ارتعاشات تولید شده توسط پیزوالکتریک به محلول اطمینان حاصل گردید. نمای انفجاری مخزن تولید مه در شکل ۳ نشان داده شده است. در قسمت بالایی و پایینی پیزوالکتریک برای جلوگیری از آسیب مکانیکی به آن و شکستگی احتمالی و همچنین آببندی قسمت زیرین پیزوالکتریک از واشر سیلیکونی



شکل ۳- نمای انفجاری مخزن تولید مه (۱) لوله ورود هوا (۲) لوله خروج مه (۳) در آببند مخزن (۴) پیچ‌های محکم کننده (۵) ورق آکرلیک (۶) واشرهای سیلیکونی (۷) سرامیک پیزوالکتریک (۸) ورق PVC (۹) مخزن آببند

در مایع می‌شود. این پاشش و تلاطم باعث شکل‌گیری ذرات کوچک با قطر در محدوده ۰/۱ تا ۱۰ میکرون می‌شود (Weathers *et al.*, 2008). اما درعین حال قطرات بزرگ‌تری هم در اثر تلاطم ایجاد شده شکل می‌گیرند که این قطرات به علت اندازه درشتشان مناسب برای سامانه‌های هوا کشت نیستند. لذا جهت جلوگیری از حمل این قطرات درشت توسط سامانه انتقال مه، چندین آزمایش اولیه انجام شد و سرعت فن طوری تنظیم شد که سرعت هوای خروجی از مخزن در محدوده‌ای قرار گیرد که قابلیت حمل ذرات درشت را نداشته باشد. در این حالت سرعت هوا در خروجی فن (ورودی سامانه) برابر با ۵ متر بر ثانیه اندازه‌گیری شد.

#### شیوه انجام آزمایش‌ها

پس از آماده‌سازی مایع مغذی و سامانه‌های تولید و انتقال مه، مخزن حاوی مایع و پیزوالکتریک بر روی ترازوی دیجیتال با دقت

#### سامانه انتقال مه

برای ایجاد قابلیت اندازه‌گیری نرخ مه تولید شده لازم بود که مه تولید شده از درون مخزن به محیط خارج انتقال داده شود؛ لذا از یک الکتروفن با قابلیت تنظیم دور موتور استفاده شد. بر روی کناره‌های در مخزن، دو سوراخ با قطر ۲۵ میلی‌متر ایجاد و دو لوله با قطر ۲۵ میلی‌متر به ارتفاع‌های ۷۰ و ۱۲۰ میلی‌متر قرار داده شد. لوله‌ها جهت جلوگیری از نشت هوا، در محل‌های اتصال به مخزن توسط چسب سیلیکون آببندی شدند. لوله کوچک‌تر (ارتفاع ۷۰ میلی‌متر) در امتداد لوله خروجی الکتروفن و با فاصله ۲ میلی‌متر از آن قرار گرفت. علت در نظر گرفت فاصله ۲ میلی‌متری بین لوله ورودی مخزن و خروجی فن، جلوگیری از وارد شدن وزن ناشی از فن به مخزن و به تبع آن به سیستم اندازه‌گیری جرم (ترازو) بود.

پیزوالکتریک در هنگام کار، موج مکانیکی با فرکانس بالا را وارد مایع می‌کند که منجر به پاشش مایع به بالا و ایجاد تلاطم



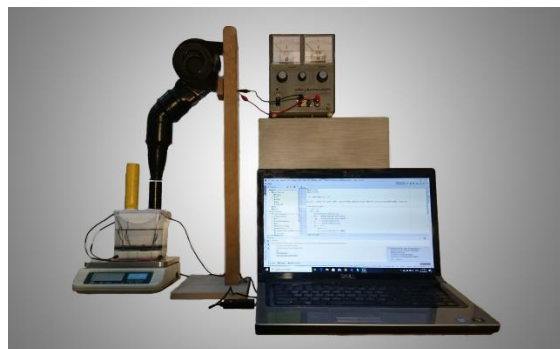
های متفاوتی از مواد غذایی را مورد آزمایش قرار داده اند (Cooper, 1988; Hewitt, 1952; Hoagland & Arnon, 1950; Steiner, 1984). در پژوهش حاضر، با توجه به منابع موجود، سطوح غلظت مواد مغذی ۰، ۲/۵، ۵ و ۷/۵ گرم بر لیتر در نظر گرفته شد. غلظت صفر به معنی عدم استفاده از کود شیمیایی و استفاده از آب شیر به عنوان محیط کشت است. سطوح غلظت به گونه ای در نظر گرفته شدند که کمترین و بیشترین مقادیر ذکر شده در منابع موجود را پوشش دهند.

در هر آزمایش، ابتدا محلول تا ارتفاع معین درون مخزن ریخته شده و قبل از راه اندازی پیزوالکتریک، فن روشن شده و پس از چند ثانیه (کمتر از ۵ ثانیه) پیزوالکتریک راه اندازی و پس از چند ثانیه (کمتر از ۵ ثانیه) ذخیره سازی داده ها آغاز گردید. علت تأخیر زمانی بین داده برداری و روشن شدن فن و پیزوالکتریک این بود که شروع به کار فن و پیزوالکتریک در چند ثانیه اول باعث تغییرات عدد ترازو می شد. لذا برای جلوگیری از بروز خطا، داده برداری با تأخیر چند ثانیه ای انجام می گرفت. فواصل داده برداری برابر با ۱/۷ ثانیه بود. در هر آزمایش به مدت ۶ دقیقه بدون توقف، پیزوالکتریک، الکتروفن و ترازو کار کرده و داده های مربوطه اندازه گیری شد. پس از پایان ۶ دقیقه مذکور مقدار سیال باقی مانده در مخزن از آن خارج و مقدار سختی و شوری آن مجدداً اندازه گیری شد. ابزارهای مورد استفاده جهت اندازه گیری سختی و شوری، سرعت سیال و کاهش جرم سیال به ترتیب سختی شوری سنج TDS-039، سرعت سنج BENETECH, GM816 و ترازوی Lutron, GM-1500P بودند.

#### تحلیل داده ها

کلیه آزمایش ها در قالب آزمایش فاکتوریل با طرح پایه کاملاً تصادفی با سه تکرار انجام گرفت. داده های اندازه گیری شده در مدت زمان هر آزمون بر روی فایل متنی ذخیره گردیدند. سپس با کد نویسی در محیط برنامه نویسی پایتون، تک تک فایل های متنی (تعداد ۳۲۴ فایل) فراخوانی شده و نمودار جرم لحظه ای بر حسب زمان رسم گردید. با برازش رگرسیون خطی به داده های تک تک فایل های متنی، نرخ تولید مه (شیب نمودار جرم بر حسب زمان) محاسبه گردید. شیب های محاسبه شده درون یک فایل اکسل<sup>۳</sup> ذخیره سازی شد. با نوشتن کد دیگری در محیط برنامه نویسی پایتون، تعداد ۳۲۴ نرخ تولید مه و متغیرهای مستقل وابسته به هریک فراخوانی شده و آنالیز ANOVA<sup>۴</sup> در همان محیط پایتون برای آن ها انجام گرفت. همچنین برای بررسی دقت

۰/۰۵ گرم قرار داده شد (شکل ۴). به منظور اندازه گیری نرخ تولید مه در حین کارکرد پیزوالکتریک، ترازو توسط یک کابل انتقال داده به لپ تاپ متصل گردید (شکل ۴). همچنین در محیط برنامه نویسی پایتون<sup>۱</sup> قابلیت انتقال، ثبت و ذخیره سازی داده های خروجی از ترازوی دیجیتال فراهم گردید. داده های خروجی در یک فایل متنی<sup>۲</sup> ذخیره می شدند که قابلیت بازخوانی توسط نرم افزار اکسل را داشت.



شکل ۴- ستاپ آماده شده برای تولید و انتقال مه فراصوتی و ذخیره داده ها

چهار پارامتر به عنوان متغیرهای مستقل در نظر گرفته شدند. متغیرهای مستقل شامل ارتفاع مایع بالای محرک پیزوالکتریک در سه سطح ۲، ۳ و ۴ سانتی متر، ابعاد مخزن تولید مه در سه سطح، موقعیت قرارگیری پیزوالکتریک در کف مخزن در سه سطح و غلظت کود در محلول در چهار سطح ۰، ۲/۵، ۵ و ۷/۵ گرم در لیتر بودند. اثر این چهار متغیر بر نرخ تولید مه، تغییرات EC و تغییرات TDS به عنوان متغیر وابسته مورد بررسی قرار گرفت.

در روش هواکشت با توجه به اینکه ریشه گیاه در معرض پاشش قطرات با قطر ریز قرار می گیرد، مقادیر کمتری از آب و مواد غذایی جهت برآورده کردن کلیه نیازهای گیاه لازم است. وجود قطرات ریز بر روی ریشه، باعث جذب اسمزی مواد غذایی توسط ریشه با راندمان بالا میشود (Lakhia et al., 2018). ترکیب مواد غذایی مورد نیاز گیاه در روش هواکشت وابسته به عوامل متعددی از قبیل نوع گیاه، شرایط آب و هوایی کشت گیاه، مرحله رشد گیاه و ... است (Lee et al., 2005). مواد غذایی باید در زمان مناسب به مقدار مناسب و با غلظت مناسب در اختیار گیاه قرار گیرد (Lakhia et al., 2018). بررسی منابع نشان میدهد، ترکیب و غلظت مواد مغذی وابستگی زیادی به نوع و مرحله رشد گیاه داشته و پژوهشگران مختلف، ترکیب ها و غلظت

رطوبت نسبی فوق اشباع بود. لذا با توجه به اینکه چگالی آب بسیار بیشتر از هواست، افت قابل توجه سرعت در خروجی مخزن قابل توجیه است.

نتایج حاصل از بررسی اثر غلظت، ارتفاع، موقعیت پیژوالکتریک و شکل مخزن بر نرخ مه تولید شده در جدول ۳ نشان داده شده است. لازم به ذکر است که مقادیر ذکر شده برای نرخ مه در جدول ۳ حاصل میانگین‌گیری از سه تکرار می‌باشد. با توجه به جدول، کمترین مقدار نرخ مه تولیدی برابر با ۰/۴۷ گرم بر دقیقه در مخزن شماره ۳، با موقعیت مرکزی پیژوالکتریک، تیمار غلظت صفر درصد و ارتفاع ۴۰ میلی‌متر به دست آمد. همچنین بیشترین مقدار نرخ مه تولیدی برابر با ۵/۴۵ گرم بر دقیقه در مخزن شماره ۱، با موقعیت مرکزی پیژوالکتریک، تیمار غلظت ۲/۵ درصد و ارتفاع ۴۰ میلی‌متر به دست آمد.

با توجه به اینکه نرخ تولید مه با برازش رگرسیون خطی به داده‌های جرم نسبت به زمان به دست آمده‌اند، برای اطلاع از دقت مدل‌ها دو شاخص آماری ریشه میانگین مربعات خطا و ضریب تبیین برای هر سه تکرار محاسبه شدند. بر اساس نتایج محاسبات انجام شده مقادیر ریشه میانگین مربعات خطا بین ۰/۴۶ و ۱/۰۰۰۶۲۷ گرم بر دقیقه و مقادیر ضریب تبیین بین ۰/۹۳ و ۱/۰۰ تغییر می‌کنند. با توجه به مقادیر به دست آمده برای ضریب تبیین مدل خطی و اینکه درجه آزادی کلیه مدل‌های رگرسیونی برابر با ۲۱۰ بود، بدیهی است، کلیه مدل‌های ارائه شده در سطح احتمال کمتر از ۱٪ معنی‌دار هستند (Snedecor & William, 1989).

به منظور تعیین اثرات منفرد و متقابل هر یک از متغیرهای مورد آزمایش، تجزیه واریانس در محیط برنامه‌نویسی پایتون صورت گرفته و نتایج حاصل در جدول ۴ نشان داده شده است. لازم به ذکر است در جدول ۴، اثرات منفرد، دوگانه، سه‌گانه و اثر چهارگانه متغیرهای مورد بررسی ذکر شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، اثر سه متغیر غلظت، موقعیت پیژوالکتریک و ابعاد مخزن بر نرخ تولید مه در سطح احتمال ۱٪ و اثر ارتفاع محلول در سطح احتمال ۵٪ معنی‌دار می‌باشند.

از بین اثرات متقابل دوگانه اثر غلظت و موقعیت در سطح احتمال ۱٪ و اثر متقابل ابعاد مخزن و ارتفاع در سطح احتمال ۵٪ معنی‌دار شدند. همچنین از بین اثرات سه‌گانه، غلظت، موقعیت و ارتفاع در سطح احتمال ۱٪ و غلظت، ارتفاع و ابعاد مخزن در سطح احتمال ۵٪ بر نقش یکدیگر در نرخ تولید مه تأثیر متقابل داشتند. همچنین اثر متقابل چهارگانه متغیرهای مذکور معنی‌دار نبود.

رگرسیون خطی از دو شاخص آماری ضریب تبیین و مجموع مربعات خطای نسبی<sup>۱</sup> استفاده شد.

همچنین داده‌های حاصل از اندازه‌گیری رسانایی الکتریکی و مجموع مواد جامد محلول، قبل و بعد از هر آزمایش ذخیره‌سازی و تغییرات این دو خصوصیت شیمیایی در اثر کارکرد پیژوالکتریک به‌عنوان پارامترهای وابسته و چهار پارامتر ارتفاع سیال بالای پیژوالکتریک، غلظت کود در محلول، موقعیت پیژوالکتریک و ابعاد مخزن به‌عنوان متغیرهای مستقل در نظر گرفته شدند. آنالیز ANOVA برای دو ویژگی مذکور (EC و TDS) انجام گرفت.

با استفاده از نرم‌افزار Design Expert 11 رفتار سه متغیر خروجی نرخ تولید مه، TDS و EC تحت اثر چهار متغیر مستقل مذکور استخراج گردید. از بین چهار متغیر مستقل ورودی، دو متغیر غلظت و ارتفاع به‌عنوان متغیر عددی<sup>۲</sup> و دو متغیر موقعیت پیژوالکتریک و ابعاد مخزن، اسمی<sup>۳</sup> بودند. با توجه به اینکه سطوح متغیرها با هم متفاوت بودند، جهت معرفی این متغیرها به نرم‌افزار، سطوح مختلف متغیرها به‌صورت کد شده برای نرم‌افزار تعریف شدند. برای کد کردن متغیر غلظت، پایین‌ترین سطح غلظت (غلظت صفر درصد) برابر با ۱- و بالاترین سطح غلظت (غلظت ۷/۵ درصد) برابر با ۱+ در نظر گرفته شدند. در این حالت میانگین غلظت بیشینه و کمینه (غلظت ۳/۷۵ درصد) برابر با صفر و غلظت ۲/۵ و ۵٪ به ترتیب برابر با ۰/۳۳- و ۰/۳۳+ نرمال‌سازی شدند. برای متغیر ارتفاع، سه سطح ۲۰، ۳۰ و ۴۰ میلی‌متر به ترتیب برابر با ۱-، ۰ و ۱+ کد شدند. برای متغیر اسمی موقعیت پیژوالکتریک، موقعیت‌های گوشه، مرکزی و میانی به ترتیب برابر با ۱-، ۰ و ۱+ و برای متغیر اسمی مخزن، مخزن‌های شماره ۱، ۲ و ۳ به ترتیب برابر با ۱-، ۰ و ۱+ در نظر گرفته شدند.

### تحلیل نتایج

همان‌گونه که قبلاً اشاره شد، دور فن طوری تنظیم شد که سرعت هوای ورودی به مخزن تولید مه برابر با ۵ متر بر ثانیه باشد. این سرعت ورودی به مخزن باعث می‌شد که سرعت هوا در خروجی مخزن هنگام کارکرد پیژو در محدوده ۳ تا ۴ متر بر ثانیه تغییر کرده و هیچ‌گونه خروج قطرات درشت از مخزن وجود نداشته باشد. افت سرعت در خروجی مخزن نسبت به ورودی آن ناشی از تغییر ماهیت فیزیکی سیال خروجی است. در قسمت ورودی سیال (هوا) دارای رطوبتی برابر با رطوبت نسبی محیط بود. این میزان در طول مدت زمان آزمایش کمتر از ۴۳٪ اندازه‌گیری شد. اما در قسمت خروجی، سیال مخلوط قطرات آب (مه) و هوا دارای



جدول ۳- مقادیر نرخ تولید مه تحت شرایط مختلف بر حسب گرم بر دقیقه

موقعیت	ارتفاع سیال (mm)	شماره مخزن	غلظت کود شیمیایی در محلول (گرم بر لیتر)		
			۷/۵	۵	۲/۵
گوشه	۲۰	۱	۳/۴۱	۲/۷۹	۲/۲۵
		۲	۱/۷۲	۴/۲۶	۲/۸۶
		۳	۳/۳۰	۲/۷۷	۳/۱۳
	۳۰	۱	۴/۵۶	۴/۳۱	۴/۰۳
		۲	۱/۵۶	۳/۲۷	۳/۶۷
		۳	۲/۶۰	۳/۰۲	۲/۸۶
	۴۰	۱	۵/۱۸	۳/۹۸	۴/۵۸
		۲	۱/۵۹	۰/۵۹	۰/۵۳
		۳	۰/۵۶	۰/۶۵	۰/۶۲
مرکز	۲۰	۱	۲/۶۱	۴/۰۸	۳/۶۱
		۲	۳/۸۰	۴/۱۲	۴/۴۳
		۳	۲/۸۸	۳/۴۲	۳/۳۵
	۳۰	۱	۳/۸۵	۴/۴۹	۴/۶۷
		۲	۳/۲۰	۳/۷۵	۳/۸۴
		۳	۱/۸۴	۲/۵۷	۲/۷۴
	۴۰	۱	۴/۱۷	۵/۴۵	۵/۳۷
		۲	۰/۹۲	۲/۲۶	۰/۸۳
		۳	۰/۴۷	۰/۵۹	۰/۶۷
میانی	۲۰	۱	۱/۸۳	۴/۷۰	۳/۲۷
		۲	۳/۶۰	۴/۴۰	۳/۹۸
		۳	۲/۶۸	۳/۵۳	۳/۵۲
	۳۰	۱	۳/۰۲	۴/۶۸	۴/۴۲
		۲	۲/۷۰	۳/۷۵	۳/۶۳
		۳	۲/۱۱	۲/۴۳	۲/۲۲
	۴۰	۱	۳/۱۴	۵/۴۴	۴/۴۰
		۲	۰/۷۷	۱/۱۹	۱/۳۳
		۳	۰/۸۰	۰/۵۲	۰/۶۴

جدول ۴- نتایج تجزیه واریانس عوامل مؤثر بر نرخ تولید مه

منبع تغییرات	درجه آزادی	مجموع مربعات خطا	میانگین مربعات خطا	آماره F	آماره P
غلظت محلول (D)	۳	۰/۰۰۶۴۷	۰/۰۰۲۱۶	۹/۶۰۲	۰/۰۰۶۵۸**
موقعیت پیژوالکتریک (L)	۲	۰/۰۰۱۶۴	۰/۰۰۰۸۲	۳/۶۴۲	۰/۰۰۰۰۱**
ارتفاع محلول بالای پیژوالکتریک (H)	۲	۰/۰۲۹۱۱	۰/۰۱۴۵۶	۶۴/۸۲۳	۰/۰۰۲۷۸۳*
ابعاد مخزن (C)	۲	۰/۰۵۳۲۸	۰/۰۲۶۶۴	۱۱۸/۶۴۲	۰/۰۰۰۰۰**
$D \times L$	۶	۰/۰۰۲۱۹	۰/۰۰۰۳۶	۱/۶۲۵	۰/۰۰۰۰۰**
$D \times H$	۶	۰/۰۰۱۰۷	۰/۰۰۰۱۸	۰/۷۹۱	۰/۱۴۱۵۷
$L \times H$	۴	۰/۰۰۰۶۸	۰/۰۰۰۱۷	۰/۷۶۰	۰/۵۷۷۷۹
$D \times C$	۶	۰/۰۰۱۳۶	۰/۰۰۰۲۳	۱/۰۰۶	۰/۵۵۲۲۷
$L \times C$	۴	۰/۰۰۲۱۹	۰/۰۰۰۵۵	۲/۴۳۸	۰/۴۲۲۰۶
$H \times C$	۴	۰/۰۴۹۶۲	۰/۰۱۲۴۰	۵۵/۲۳۶	۰/۰۴۸۱۰*
$D \times L \times H$	۱۲	۰/۰۰۱۷۹	۰/۰۰۰۱۵	۰/۶۶۳	۰/۰۰۰۰۰**
$D \times L \times C$	۱۲	۰/۰۰۴۹۱	۰/۰۰۰۴۱	۱/۸۲۳	۰/۷۸۶۰۱
$D \times H \times C$	۱۲	۰/۰۰۱۹۸	۰/۰۰۰۱۶	۰/۷۳۴	۰/۰۴۶۰۱*
$L \times H \times C$	۸	۰/۰۰۰۶۵	۰/۰۰۰۰۸	۰/۳۶۴	۰/۷۱۷۴۳
$D \times L \times H \times C$	۲۴	۰/۰۰۳۶۵	۰/۰۰۰۱۵	۰/۶۶۰	۰/۹۳۸۲۸
باقیمانده	۲۱۷	۰/۰۴۸۰۶	۰/۰۰۰۲۲		

\*\* معنی داری در سطح احتمال ۱٪

\* معنی داری در سطح احتمال ۵٪

با افزایش ارتفاع محلول بالای پیزوالکتریک، به دلیل میرا شدن امواج مکانیکی تولید و وارد شده به سیال انتظار کاهش نرخ تولید مه معقول به نظر می‌رسد. کاهش ارتفاع محلول در بالای پیزوالکتریک باعث می‌شود که در هنگام کار کردن پیزوالکتریک، موج مکانیکی به خوبی میرا نشده باشد و توان بالای موج باعث جابجایی سیال در قسمت فوقانی پیزوالکتریک شده که این پدیده تشکیل امواج کاپیلاری مناسب برای جدایش ذرات مه را مختل می‌کند. نتایج یک پژوهش نشان داد که با افزایش ارتفاع مایع سرعت تولید مه افزایش یافته و پس از رسیدن به یک حداکثر، مقدار کاهش می‌یابد. این روند برای همه مایعات (MS, B5, MS, 1/2 و آب) مشابه است (Gholami, 2017). هنگامی که ارتفاع مایع روی سطح پیزو کم باشد. به جای تشکیل یک مه نسبتاً همگن، قطر ذرات تشکیل شده یکنواخت نیست. در این حالت، قطرات با قطر بزرگ‌تر بر روی سطح مایع شکل می‌گیرد (Barreras et al, 2002).

با توجه به نتایج به دست آمده، افزایش غلظت در ابتدا موجب افزایش نرخ تولید مه و در ادامه باعث کاهش آن می‌گردد. نظر به اینکه افزودن کود شیمیایی به آب موجب تغییر ماهیت فیزیکوشیمیایی آب می‌شود و با توجه به اینکه امواج کاپیلاری در اثر پدیده تشدید به وقوع می‌پیوندند، انتظار می‌رود محلول با هر غلظتی دارای فرکانس طبیعی منحصر به فرد باشد. تغییر فرکانس کاری پیزوالکتریک از فرکانس طبیعی محلول باعث کاهش نرخ تولید مه می‌شود (Kirpalani & Suzuki, 2011). لذا انتظار می‌رود که با تغییر فرکانس کاری پیزوالکتریک، نرخ تولید مه در غلظت‌های متفاوت محلول به مقدار بیشینه خود برسد. از طرفی دلیل وقوع این پدیده را می‌توان مربوط به کشش سطحی سیال دانست. در مقادیر کم غلظت، کشش سطحی کاهش یافته در نتیجه شدت تولید مه بیشتر می‌شود؛ در حالی که با افزایش میزان غلظت به نظر می‌رسد با توجه به رابطه ۱، افزایش میزان چگالی در غلظت‌های بالا منجر به کاهش طول موج فرکانس و نهایتاً میزان کمتر مه‌سازی گردد (Barreras et al, 2002).

$$\lambda = \left( \frac{2\pi\sigma}{\rho f^2} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (\text{رابطه ۱})$$

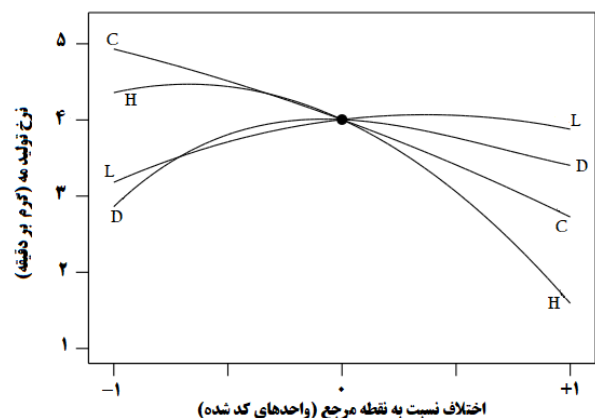
در رابطه اخیر،  $\lambda$  طول موج تشکیل شده بر سطح مایع،  $\sigma$  ضریب کشش سطحی سیال،  $\rho$  چگالی سیال و  $f$  فرکانس کارکرد پیزوالکتریک هستند.

مقادیر اولیه TDS و EC در شکل ۶ نشان داده شده است. با توجه به شکل ۶، افزایش غلظت محلول موجب افزایش هر دو پارامتر مذکور به صورت خطی می‌گردد. نتایج برازش رگرسیون

با توجه به جدول ۴، بین دو متغیر غلظت و موقعیت پیزوالکتریک اثر متقابل در سطح احتمال ۱٪ معنی‌دار است. با بررسی جدول ۳، مشاهده می‌شود که در غلظت‌های پایین نرخ تولید مه در مخزن‌های ۱، ۲ و ۳ به ترتیب افزایش یافته حال آنکه، در غلظت‌های بالا این رفتار معکوس بوده و نرخ تولید مه در مخزن‌های ۱، ۲ و ۳ به ترتیب کاهش می‌یابد. همچنین با بررسی جدول ۴ مشاهده می‌شود که اثر ارتفاع محلول و شماره مخزن در سطح احتمال ۵٪ معنی‌دار است، به طوری که طبق جدول ۳، با افزایش ارتفاع محلول در مخزن شماره ۱ نرخ تولید مه افزایش یافته و در مخزن‌های شماره ۲ و ۳ نرخ تولید مه با افزایش ارتفاع محلول، کاهش می‌یابد.

عدم معنی‌داری اثر متقابل بین غلظت و ارتفاع محلول در جدول شماره ۴ نشان دهنده این است که تغییر در غلظت محلول موجب تغییر در رفتار نرخ تولید مه با تغییر در ارتفاع محلول نمی‌گردد. عدم معنی‌داری اثر متقابل ارتفاع محلول و موقعیت پیزوالکتریک حاکی از آن است که تغییر موقعیت پیزوالکتریک منجر به تغییر رفتار تولید مه با تغییر ارتفاع محلول نمی‌گردد. نتیجه مذکور برای دو پارامتر موقعیت و شماره مخزن و نیز ارتفاع محلول و شماره مخزن صادق است.

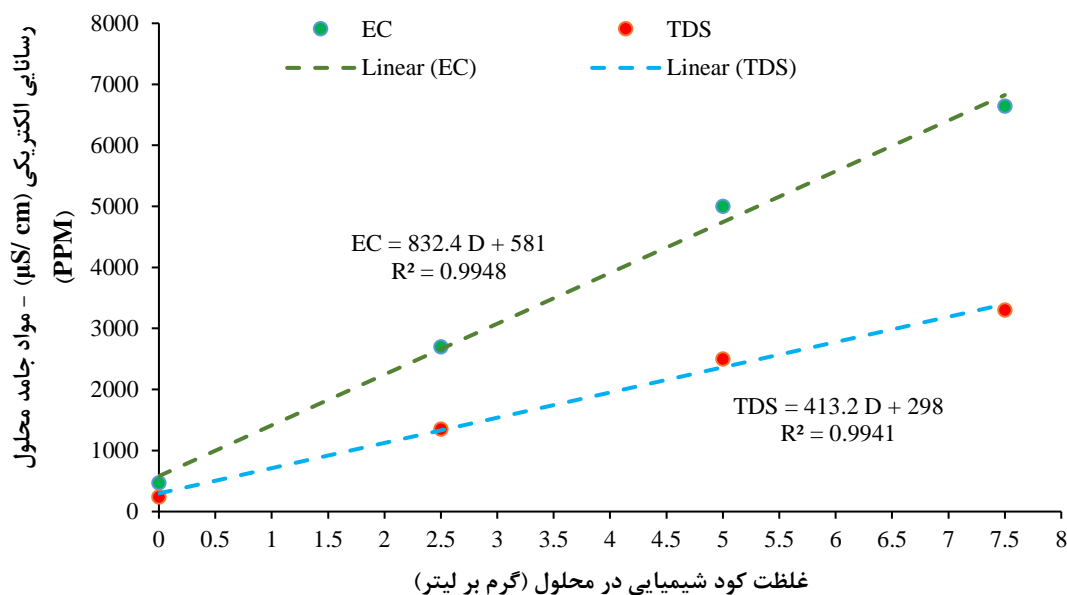
شکل ۵ رفتار نرخ تولید مه تحت تأثیر هر یک از چهار متغیر مورد بررسی را در نقاط مرکزی سه متغیر دیگر نمایش می‌دهد. به عنوان مثال، ابعاد مخزن (C) در نرخ تولید مه در صورت ثابت بودن سایر متغیرها در نقاط مرکزی (جایی که مقدار کد شده متغیرها برابر با صفر است) رفتار نزولی از خود نشان می‌دهد. به عبارت دیگر، بیشترین نرخ تولید مه متعلق به مخزن شماره ۱ (کد -۱) و کمترین نرخ متعلق به مخزن شماره ۳ (کد +۱) می‌باشد. از عوامل مؤثر بر کاهش نرخ تولید مه با افزایش مساحت مخزن، کاهش سرعت جریان چرخشی (به علت فضای بزرگ‌تر هوای بالای مایع در مخازن بزرگ‌تر) را می‌توان نام برد.



شکل ۵- رفتار نرخ تولید مه تحت اثر هر یک از متغیرهای مستقل در نقاط مرکزی سه متغیر دیگر

یون‌ها عامل مؤثر در هدایت الکتریکی هستند. اثر مستقیم غلظت یون بر هدایت الکتریکی توسط دیگران گزارش شده است (LeLAS, 2007). نتایج بلداجی و همکاران نشان داد که هدایت الکتریکی آب گوجه‌فرنگی نیز در طول غلظت افزایش یافته است (Boldaji et al., 2015).

خطی به تغییرات رسانایی الکتریکی و مجموع مواد جامد محلول نسبت به تغییر غلظت، در شکل ۶ نشان داده شده است. شیب رگرسیون برای رسانایی الکتریکی تقریباً دو برابر مجموع مواد جامد محلول است که این پدیده در محلول‌های رقیق صادق است (Hubert & Wolkersdorfer, 2015). دلیل افزایش روند هدایت الکتریکی با افزایش غلظت محلول ناشی از افزایش یون‌ها می‌باشد.



شکل ۶- تغییرات رسانایی الکتریکی و مجموع مواد جامد محلول در اثر تغییرات غلظت کود شیمیایی

غلظت محلول، تغییر این دو پارامتر ابتدا روند کاهشی و در ادامه روند افزایشی از خود نشان می‌دهد. این رفتار دقیقاً معکوس رفتار نرخ تولید مه تحت اثر تغییرات غلظت محلول است. لذا می‌توان گفت، کارکرد مؤثر پیژوالکتریک با نرخ بیشینه تولید مه نه تنها از جنبه ایجاد رطوبت مطلوب حائز اهمیت است، بلکه توانایی انتقال مواد غذایی موجود در محلول را هم افزایش خواهد داد به طوری که غلظت مواد غذایی موجود در محلول پس از کارکرد پیژوالکتریک نسبت به قبل از آن کاهش پیدا می‌کند. با توجه به شکل ۷، ملاحظه می‌شود که تغییرات EC و TDS در تمامی گستره تغییرات سه متغیر ارتفاع، موقعیت پیژوالکتریک و شماره مخزن کمتر از صفر هستند؛ که به علت ترسیم نمودار تغییرات هر یک از متغیرها در نقطه مرکزی سایر متغیرها می‌باشد. لذا با توجه به اینکه نقطه مرکزی متغیر غلظت محلول (۳/۷۵٪) باعث کاهش EC و TDS می‌گردد، قرار گرفتن نمودار تغییرات TDS و EC نسبت به تغییرات ارتفاع، موقعیت پیژوالکتریک و شماره مخزن در زیر محور افقی قابل انتظار است.

به منظور تعیین اثرات هر یک از متغیرهای مورد آزمایش در مدل رگرسیونی پیش بینی تغییرات EC و TDS، تجزیه واریانس در محیط نرم‌افزار Design Expert 11 صورت گرفته و نتایج حاصل در جدول ۵ نشان داده شده است. همان گونه که مشاهده می‌شود، اثر متغیر غلظت محلول بر تغییرات EC و TDS در سطح احتمال ۱٪ معنی‌دار و اثر سه متغیر ارتفاع سیال، موقعیت پیژوالکتریک و ابعاد مخزن بر تغییرات EC و TDS معنی‌دار نمی‌باشند. همچنین دو مدل ارائه شده برای پیش‌بینی تغییرات EC و TDS در سطح احتمال ۱٪ معنی‌دار هستند. مقادیر ضریب تبیین و انحراف معیار برای مدل ارائه شده برای تغییرات EC به ترتیب برابر با ۰/۵۸۳۵ و ۱۶۹/۷۱۱ میکروزیمنس بر سانتی‌متر و برای تغییرات TDS برابر با ۰/۶۵۶۰ و ۹۶/۱۶۸ PPM به دست آمدند.

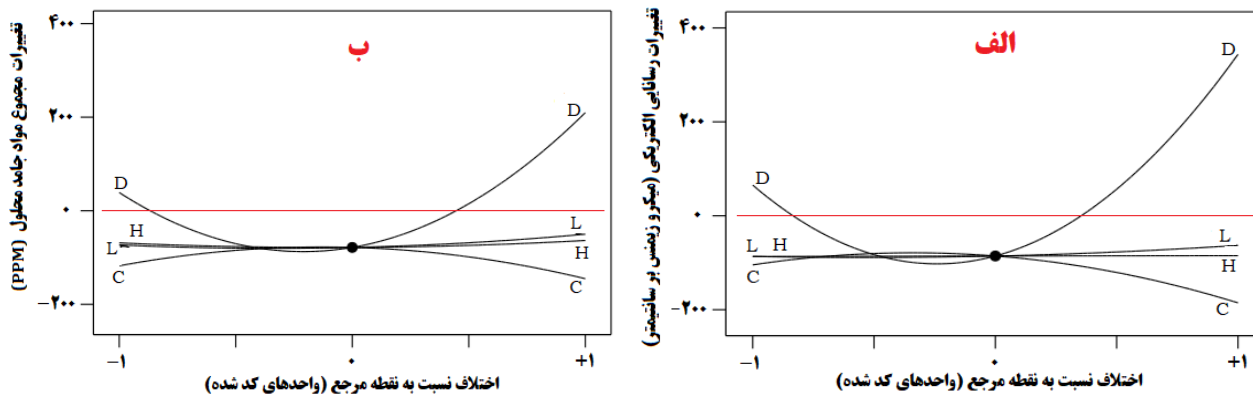
نتایج حاصل از تغییرات مقادیر EC و TDS در اثر کارکرد پیژوالکتریک و تولید مه در شکل ۷ نشان داده شده‌اند. مقایسه بین شکل ۷ الف و ب نشان می‌دهد که عوامل مؤثر بر تغییر این دو پارامتر یکسان بوده و رفتار مشابهی دارند. در این بین غلظت محلول اثر بیشتری از خود نشان می‌دهد؛ به گونه‌ای که با افزایش

جدول ۵- نتایج تجزیه واریانس عوامل مؤثر بر تغییرات رسانایی الکتریکی و مجموع مواد جامد محلول

تغییرات مجموع مواد جامد محلول			تغییرات رسانایی الکتریکی			درجه آزادی	منبع تغییرات
آماره P	آماره F	میانگین مربعات خطا	آماره P	آماره F	میانگین مربعات خطا		
۰/۰۰۰۰**	۸/۸۳۴	۸۱۶۹۹/۴۱	۰/۰۰۰۰**	۶/۴۸۹	۱۸۶۹۰۹/۰۹	۱۹	مدل
۰/۰۰۰۰**	۴۷/۲۴۲	۴۳۶۹۰۶/۷۰	۰/۰۰۰۰**	۴۰/۳۷۵	۱۱۶۲۸۷۶/۸۲	۱	D
۰/۸۲۲۱	۰/۰۵۱	۴۷۰/۲۲	۰/۹۶۵۲	۰/۰۰۲	۵۵/۱۲	۱	H
۰/۳۱۳۰	۱/۰۳۰	۹۵۲۲/۰۰	۰/۵۵۸۴	۰/۳۴۵	۹۹۴۰/۵۰	۱	L
۰/۲۲۲۹	۱/۴۷۲	۱۳۶۱۲/۵۰	۰/۰۵۶۴	۴/۰۸۱	۱۱۷۵۳۱/۶۸	۱	C
۰/۸۶۰۳	۰/۰۳۱	۲۸۸/۰۱	۰/۶۱۳۸	۰/۲۵۷	۷۳۸۹/۳۴	۱	D×H
۰/۳۱۱۸	۱/۰۳۵	۹۵۶۸/۷۱	۰/۲۴۵۸	۱/۳۶۵	۳۹۳۱۲/۹۰	۱	D×L
۰/۰۸۲۹	۳/۰۷۶	۲۸۴۴۴/۴۴	۰/۰۶۵۲	۳/۴۸۷	۱۰۰۴۳۳/۸۰	۱	D×C
۰/۱۸۰۲	۱/۸۲۵	۱۶۸۷۵/۰۰	۰/۹۷۰۹	۰/۰۰۱	۳۸/۵۲	۱	H×L
۰/۴۳۲۸	۰/۶۲۱	۵۷۴۲/۱۹	۰/۶۵۱۴	۰/۲۰۵	۵۹۱۸/۵۲	۱	H×C
۰/۳۰۱۱	۱/۰۸۲	۱۰۰۰۵/۱۹	۰/۴۲۸۱	۰/۶۳۴	۱۸۲۵۲/۰۰	۱	L×C
۰/۰۰۰۰**	۹۴/۷۸۶	۸۷۶۶۰۰/۹۰	۰/۰۰۰۰**	۶۲/۳۵۵	۱۷۹۵۹۳۸/۲۳	۱	D <sup>2</sup>
۰/۵۳۱۴	۰/۳۹۵	۳۶۵۰/۶۷	۰/۹۹۷۸	۰/۰۰۰	۰/۲۳	۱	H <sup>2</sup>
۰/۳۹۳۵	۰/۷۳۵	۶۸۰۰/۶۷	۰/۷۵۴۶	۰/۰۹۸	۲۸۳۱/۱۳	۱	L <sup>2</sup>
۰/۰۴۸۲*	۷/۳۱۳	۶۷۶۲۸/۱۷	۰/۰۹۰۲	۲/۹۳۵	۸۴۵۳۰/۲۳	۱	C <sup>2</sup>
۰/۰۷۵۵	۳/۲۳۶	۲۹۹۲۶/۶۷	۰/۲۹۱۳	۱/۱۲۷	۳۲۴۵۷/۰۰	۱	D×H×L
۰/۲۸۷۳	۱/۱۴۶	۱۰۶۰۰/۱۰	۰/۳۱۰۷	۱/۰۴۰	۲۹۹۴۹/۰۰	۱	D×H×C
۰/۲۱۴۹	۱/۵۶۰	۱۴۴۳۰/۵۰	۰/۳۱۱۱	۱/۵۸۷	۴۵۷۰۵/۶۰	۱	D×L×C
۰/۵۱۹۳	۰/۴۱۹	۳۸۷۲/۰۰	۰/۱۷۴۶	۱/۸۷۳	۵۳۹۲۶/۱۲	۱	H×L×C
۰/۳۷۵۳	۰/۷۹۴	۷۳۴۴/۱۰	۰/۲۱۸۹	۱/۵۳۳	۴۴۱۵۶/۰۲	۱	D×H×L×C
		۹۲۴۸/۲۴			۲۸۸۰۱/۸۶	۸۸	باقیمانده

\* معنی داری در سطح احتمال ۵٪

\*\* معنی داری در سطح احتمال ۱٪



شکل ۷- رفتار تغییرات شیمیایی محلول تحت اثر هر یک از متغیرهای مستقل در نقاط مرکزی سه متغیر دیگر (الف) رسانایی الکتریکی (ب) مجموع مواد جامد محلول

### نتیجه گیری کلی

پیزوالکتریک در کف مخزن و ابعاد مخزن مورد آزمایش قرار گرفت. نتایج به دست آمده نشان دادند که کلیه متغیرهای مورد آزمایش در سطح احتمال ۵٪ بر نرخ تولید مه مواد غذایی معنی دار بوده و اثر متغیر غلظت بر تغییرات TDS و EC در سطح احتمال ۱٪ معنی دار و سایر متغیرهای مذکور بدون تأثیر معنی دار بودند. با توجه به نتایج به دست آمده، افزایش غلظت محلول در ابتدا موجب افزایش نرخ تولید مه و در ادامه موجب کاهش آن

با توجه به اینکه هواکشت قابلیت زیادی در بالا بردن کیفیت و کمیت تولید محصول دارا می باشد، در این تحقیق امکان انتقال مواد غذایی محلول در آب به صورت مه و با فشار پایین به ریشه گیاه مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور در یک سامانه تولید و انتقال مه فراصوتی اثر متغیرهای غلظت مواد غذایی موجود در محلول، ارتفاع محلول بالای پیزوالکتریک، موقعیت نصب

می‌شود. همچنین خواص مکانیکی سیال مورد بررسی از قبیل ویسکوزیته و کشش سطحی بر نرخ تولید مه و اندازه ذرات اثر داشته و اندازه گیری خاص مذکور . بررسی اثر آن‌ها می‌تواند موضوع پژوهش‌های آینده قرار گیرد. علاوه بر موارد مذکور، اثرات پارامترهای مستقلی از قبیل فرکانس ارتعاش پیزوالکتریک، ولتاژ اعمال شده به دو سر پیزوالکتریک، قطر سرامیک پیزوالکتریک و تعداد پیزوالکتریک بر نرخ تولید مه و اندازه ذرات تولیدی در پژوهش‌های آتی می‌توانند مورد بررسی قرار گیرند.

### سپاسگزاری

بدین‌وسیله از مدیریت محترم و کلیه کارکنان گرمای گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی دانشگاه تهران به‌ویژه جناب آقای سیدحسین سیدمیرزایی جهت ارائه برخی امکانات و تجهیزات آزمایشگاهی کمال تقدیر و تشکر به عمل می‌آید. همچنین از آقایان مهندس بهمن فلاح نژاد، سید محمدحسین افتخاری و سرکار خانم آیدا چمنی به خاطر همکاری در انجام برخی از آزمایش‌ها سپاسگزاری می‌شود.

هیچگونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد.

### REFERENCES

- Boguslavski, Y. Y. (1969). Physical mechanism of the acoustic atomization of a liquid. *Sov. Phys. Acoust.*, 15, 14-21.
- Boguslavskii, Y. Y., & Éknadosyants, O. K. (1969). On the physical mechanism of atomization of a liquid by acoustic vibrations. *Akust. Zh*, 15, 17-42.
- Boldaji, M. T., Borghai, A. M., Beheshti, B., & Hosseini, S. E. (2015). The process of producing tomato paste by ohmic heating method. *Journal of food science and technology*, 52(6), 3598-3606.
- Chiba, C. (1975). Atomization of Liquid by Immersed and Convergent Ultrasonic Vibrators: Case of Distilled Water. *Bulletin of JSME*, 18(118), 376-382.
- Cooper, A. (1988). 1. The system. 2. Operation of the system. *The ABC of NFT. Nutrient Film Technique*. Grower Books (ed.). London, 3-123.
- Eknadosyants, O. K. (1970). Poluchenie aerolei. *Fizicheskie osnovy ul'trazvukovoi tekhnologii (Production of Aerosols. Physical Principles of Ultrasonic Technology)*, Rozenberg, LD, Ed.
- Estaji, A., & Roosta, H. R. (2015). Effect of NH<sub>4</sub><sup>+</sup> and NO<sub>3</sub><sup>-</sup> on photosynthetic parameters of liquorice (*Glycyrrhiza glabra*) in aeroponic system. Ninth national congress of horticultural science, Shahid Chamran University of Ahwaz, Ahwaz, Iran.
- Firouz, M. S., Farahmandi, A., & Hosseinpour, S. (2019). Recent advances in ultrasound application as a novel technique in analysis, processing and quality control of fruits, juices and dairy products industries: A review. *Ultrasonics sonochemistry*.
- Gholami, O. (2017). Design and manufacture of mist bioreactor and performance evaluation of mist production and transmission system. M.Sc. thesis. College of Aboureyhan, University of Tehran (In Persian).
- Gysi, C., & Von Allmen, F. (1997). Balance of water and nutrients in tomatoes grown on soilless systems. *Agralforschung*, 4(1), 28.
- Hassanpanah, D. (2014). Evaluating potential production of mid-late maturing minituber of potato cultivars and promising clones under aeroponic system. *Journal of Crop Ecophysiology*, 8(3), 331-346.
- Hewitt, E. J. (1952). Sand and water culture methods used in the study of plant nutrition. *Sand and water culture methods used in the study of plant nutrition*.
- Hoagland, D. R., & Arnon, D. I. (1950). The water-culture method for growing plants without soil. *Circular. California agricultural experiment station*, 347(2nd edit).
- Hubert, E., & Wolkersdorfer, C. (2015). Establishing a conversion factor between electrical conductivity and total dissolved solids in South African mine waters. *Water Sa*, 41(4), 490-500.
- Jalilvand, R., & Noori Hendi, L. (2010). Hydroponic cultivation correct solution of water consumption pattern to overcome crisis Drought in Sistan area. Second national congress of water, Islamic Azad University of Behbahan, Behbahan, Khuzestan, Iran.

می‌گردد؛ درحالی‌که این افزایش ابتدا موجب کاهش تغییرات TDS و EC گشته (تا جایی که منجر به منفی شدن این تغییرات نیز می‌شود) و در ادامه موجب افزایش آن می‌گردد. این دو رفتار متناقض بیانگر توانایی انتقال بهتر مواد مغذی محلول در آب توسط سامانه فراصوتی در دامنه خاصی از غلظت محلول می‌باشد. با توجه به اینکه روش امواج فراصوت قابلیت انتقال مواد شیمیایی محلول در آب را دارد، استفاده از روش مه‌سازی فراصوتی در سامانه‌های هوا کشت می‌تواند به‌عنوان یک روش جایگزین برای روش‌های مه‌سازی متداول مطرح شود. مقادیر نرخ تولید مه در کلیه شرایط کمتر از ۳۳۰ میلی‌لیتر در ساعت به‌دست آمد، بهینه‌سازی‌هایی از قبیل افزایش ولتاژ ورودی به محرک پیزوالکتریک، افزایش بسامد تحریک پیزوالکتریک، تعیین ارتفاع بهینه سیال در بالای محرک پیزوالکتریک، به‌کارگیری هم‌زمان تعداد زیادی پیزوالکتریک و ... می‌تواند نرخ تولید مه را تا چند لیتر در ساعت افزایش دهد.

علاوه بر نرخ مه تولیدی، اندازه ذرات مه می‌تواند به عنوان پارامتری مهم در عملکرد سامانه تولید مه مطرح گردد. لذا بررسی اثر متغیرهای مستقل مورد بررسی در پژوهش حاضر بر روی اندازه ذرات تولیدی، به عنوان پیشنهادی برای پژوهش‌های آتی ارائه

- Kang, B. K., & Han, S. H. (2005). Production of seed potato (*Solanum tuberosum* L.) under the recycling capillary culture system using controlled release fertilizers. *Journal of the Japanese Society for Horticultural Science (Japan)*.
- Kirpalani, D. M., & Suzuki, K. (2011). Ethanol enrichment from ethanol–water mixtures using high frequency ultrasonic atomization. *Ultrasonics sonochemistry*, 18(5), 1012-1017.
- Lakhiar, I. A., Gao, J., Syed, T. N., Chandio, F. A., & Buttar, N. A. (2018). Modern plant cultivation technologies in agriculture under controlled environment: A review on aeroponics. *Journal of plant interactions*, 13(1), 338-352.
- Lee, G. J., Kang, B. G., Kim, T. I., Kim, T. J., & Kim, J. H. (2005). Tomato hydroponics in Korea. *Fruit, Vegetable and Cereal Science and Biotechnology*, 1(2), 104-109.
- LeLAS, V. (2007). Ultrasonic effect on pH, electric conductivity, and tissue surface of button mushrooms, Brussels sprouts and cauliflower. *Czech J. Food Sci.* Vol. 25(2), 90-100.
- Lugt, C., Bodlaender, K. B. A., & Goodijk, G. (1964). Observations on the induction of second-growth in potato tubers. *European Potato Journal*, 7(4), 219-227.
- Nichols, M., & Christie, B. (2002). Rapid high health seed potato production using aeroponics. *Grower*, 57, 20-24.
- Nugaliyadde, M. M., De Silva, H. D. M., Perera, R., Ariyaratna, D., & Sangakkara, U. R. (2005). An aeroponic system for the production of pre-basic seed potato. *Annals of the Sri Lanka Department of Agriculture*, 7, 199-288.
- Rezaei, M., Moeini, A., Dehghani, H., & Movhedi, Z. (2014). Investigation of effect of paclobutrazol on minituber production and vegetative properties of potato (*Solanum tuberosum* L.) in aeroponic system. *Plant Production (Scientific Journal of Agriculture)*, 38(1), 55-63.
- Ritter, E., Angulo, B., Riga, P., Herran, C., Relloso, J., & San Jose, M. (2001). Comparison of hydroponic and aeroponic cultivation systems for the production of potato minitubers. *Potato Research*, 44(2), 127-135.
- Rooney, J. A. (1981). 6. Nonlinear Phenomena. In *Methods in Experimental Physics (Vol. 19, pp. 299-353)*. Academic Press.
- Roosta, H. R., Rashidi, M., Karimi, H. R., Alaei, H., & Tadayyonnejhad, M. (2013). Comparison of vegetative growth and minituber yield in three potato cultivars in aeroponics and classic hydroponics with three different nutrient solutions. *Journal of Science and Technology of Greenhouse Culture*, 4(14), 73-80.
- Simon, J. C., Sapozhnikov, O. A., Khokhlova, V. A., Crum, L. A., & Bailey, M. R. (2015). Ultrasonic atomization of liquids in drop-chain acoustic fountains. *Journal of fluid mechanics*, 766, 129-146.
- Snedecor, G. W. C., & William, G. (1989). *STATISTICAL METHODS/GEORGE W. SNEDECOR AND WILLIAM G. COCHRAN (No. QA276. 12. S6313 1989.)*.
- Soffer, H., & Burger, D. W. (1988). Effects of dissolved oxygen concentrations in aero-hydroponics on the formation and growth of adventitious roots. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 113(2), 218-221.
- Söllner, K. (1936). Experiments to demonstrate cavitation caused by ultrasonic waves. *Transactions of the Faraday Society*, 32, 1537-1539.
- Steiner, A. A. (1984). The universal nutrient solution. In 6. International Congress on Soilless Culture, Lunteren (Netherlands), 29 Apr-5 May 1984. ISOSC.
- Topp, M. N. (1973). Ultrasonic atomization-a photographic study of the mechanism of disintegration. *Journal of Aerosol Science*, 4(1), 17-25.
- Topp, M. N., & Eisenklam, P. (1972). Industrial and medical uses of ultrasonic atomizers. *Ultrasonics*, 10(3), 127-133.
- Weathers, P., Liu, C., Towler, M., & Wyslouzil, B. (2008). Mist reactors: principles, comparison of various systems, and case studies. *Electronic Journal of Integrative Biosciences*, 3(1), 29-37.
- Wood, R. W., & Loomis, A. L. (1927). XXXVIII. The physical and biological effects of high-frequency sound-waves of great intensity. *The London, Edinburgh, and Dublin philosophical magazine and journal of science*, 4(22), 417-436.