

## بررسی اثر رطوبت و بسامد بر برخی خواص دی‌الکتریکی دو رقم شلتوک

محمد طهماسبی<sup>۱\*</sup>، رضا طباطبایی کلور<sup>۲</sup>، جعفر هاشمی<sup>۳</sup>

۱. دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری

۲. دانشیار، دانشکده مهندسی زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری

۳. استادیار، دانشکده مهندسی زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۵/۲۸ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۴/۱۰/۵)

### چکیده

خواص دی‌الکتریکی محصولات کشاورزی یکی از مهم‌ترین خصوصیات فیزیکی محصولات کشاورزی و غذایی به شمار می‌رود و استفاده از این خواص به عنوان یک فناوری جدید برای استفاده در کشاورزی و صنایع وابسته به شدت در حال توسعه می‌باشد. لذا در این تحقیق، تغییرات خواص دی‌الکتریک شلتوک ارقام قائم و پژوهش در ۴ سطح رطوبت (۱۳، ۱۶، ۱۹ و ۲۲ درصد بر پایه خشک) و ۴ بسامد (۱۰۰، ۳۰۰، ۵۰۰ و ۷۰۰ کیلوهرتز) در ۳ تکرار به صورت فاکتوریل و در قالب طرح کاملاً تصادفی بررسی شد. نتایج نشان دادند که بین ارقام مورد بررسی از نظر خواص دی‌الکتریکی تفاوت معنی داری وجود ندارد، اما رطوبت بر کلیه خواص مورد بررسی اثری معنی‌دار و افزایشی دارد، همچنین افزایش بسامد ولتاژ ورودی هرچند منجر به افزایش هدایت الکتریکی شلتوک می‌گردد اما اثر معکوسی بر ثابت دی‌الکتریک نسبی و اتلافی آن دارد. در بین اثرات متقابل این عوامل نیز تنها اثر متقابل رطوبت و بسامد تاثیر معنی‌داری بر ثابت دی‌الکتریک نسبی و اتلافی شلتوک دارند. همچنین مدل‌های MLR توانستند رابطه بین رطوبت با ثابت دی‌الکتریک نسبی را در کلیه سطوح بسامد و رطوبت با ثابت دی‌الکتریک اتلافی و هدایت الکتریکی را در بسامدهای ۱۰۰KHz و ۷۰۰KHz با دقت قابل قبولی پیش‌بینی نماید.

واژه‌های کلیدی: بسامد، خواص دی‌الکتریک، رطوبت، رقم، شلتوک

### مقدمه

دی‌الکتریک دانه و مقدار آب موجود در غلات می‌باشد. خواص دی‌الکتریک دانه در درجه اول متناسب با جرم آب در نمونه است، چرا که گذردهی نسبی آب در حدود ۸۰ است در حالی که این ویژگی برای دانه خشک کمتر از سه است. بنابراین، میزان رطوبت در یک نمونه دانه با استفاده از خواص دی‌الکتریک به سهولت قابل اندازه‌گیری می‌باشد (Lawrence *et al.*, 1998). گذردهی یا ضریب دی‌الکتریک معمولاً برای توصیف خاصیت دی‌الکتریکی استفاده می‌شود، این مقدار تحت تاثیر انعکاس امواج الکترومغناطیسی و میرایی انرژی موج در مواد است. اولین گزارش‌ها در زمینه خواص دی‌الکتریکی به حدود ۸۵ سال پیش بر می‌گردد که تحقیقاتی به منظور تعیین محتوای رطوبتی غلات بر پایه اندازه‌گیری مقاومت دی‌الکتریک و استفاده از جریان مستقیم انجام شد (Debye, 1929)، در سال‌های بعد جریان متناوب نیز مورد استفاده قرار گرفت (Nelson, 2006). به طور کلی خواص دی‌الکتریک محصولات کشاورزی و مواد غذایی وابسته به رطوبت، وزن مخصوص ظاهری، دما و بسامد می‌باشد (Gradinarsky *et al.*, 2006)؛ اثر این پارامترها بر خواص دی‌الکتریک برخی محصولات کشاورزی

خواص دی‌الکتریکی محصولات کشاورزی یکی از مهم‌ترین خصوصیات فیزیکی محصولات کشاورزی و غذایی به شمار می‌رود (Ragni *et al.*, 2007)؛ ارتباط این خواص با بسیاری از مولفه‌های کمی و کیفی محصول، سرعت بالا (Nelson, 2005)، هزینه کم و کارایی فراوان (Soltani *et al.*, 2011)، استفاده از آن را به عنوان یک فناوری جدید و غیر مخرب سنجش طیف وسیعی از ویژگی‌های کمی (Kumhala *et al.*, 2009) و کیفی (Berbert *et al.*, 2001) محصولات کشاورزی، توجه بسیاری از پژوهشگران را به خود جلب نموده است و کاربردهای این روش در مقالات متعدد گزارش شده است (Venkatesh & Jha, 2010; Raghavan, 2005; Nelson, 2008). خواص دی‌الکتریک غلات و دانه‌های روغنی به طور گسترده برای تعیین رطوبت دانه به عنوان روش سنجش سریع رطوبت استفاده می‌شود. اساس این روش متکی بر ارتباط بین خواص

\* نویسنده مسئول : M.Tahmasbi@sanru.ac.ir

دی‌الکتریک نسبی و اتلافی با افزایش بسامد کاهش اما با افزایش رطوبت، افزایش می‌یابند. همچنین با استفاده از معادلات درجه دوم و سوم می‌توان رابطه بین رطوبت و گذردهی را در دمای ۲۷ و ۴۰ درجه سانتی‌گراد و بسامد ۹۱۵ و ۲۴۵۰ مگاهرتز با ضریب تعیین نسبت خوبی نشان داد.

در این تحقیق اثر رطوبت و بسامد ولتاژ ورودی سامانه اندازه‌گیری بر خواص دی‌الکتریکی در دو رقم شلتوک قائم و پژوهش در حین انتقال به وسیله یک سیستم نوار نقاله مورد بررسی قرار گرفته است. انجام تحقیقاتی از این دست می‌تواند در طراحی سامانه برخط جهت اندازه‌گیری رطوبت شلتوک در طی فرآیند برداشت، فرآوری و انبارداری موثر باشد.

## مواد و روش‌ها

### اصول نظری

به طور کلی ثابت دی‌الکتریک به شکل یک کمیت فیزیکی مختلط توصیف می‌شود که به ترتیب بخش حقیقی آن بیانگر ذخیره انرژی و بخش موهومی آن بیانگر اتلاف انرژی در ماده است:

$$\varepsilon^* = \varepsilon' - j\varepsilon'' \quad (\text{رابطه ۱})$$

که در این در این رابطه  $\varepsilon'$ ،  $\varepsilon''$  و  $\varepsilon'$  به ترتیب ثابت دی‌الکتریک مختلط، ثابت دی‌الکتریک نسبی و ثابت دی‌الکتریک اتلافی می‌باشد. اما به علت شکل مختلط رابطه محاسبه  $\varepsilon''$  و  $\varepsilon'$  از این رابطه بسیار مشکل بوده و نیازمند استفاده از روابط و پارامترهای کمکی نظیر ثابت دی‌الکتریک معادل می‌باشد.

جهت محاسبه ثابت دی‌الکتریک معادل باید ظرفیت خازن در حالتی که محصول بین صفحات حسگر قرار دارد، بر ظرفیت حسگر بدون حضور محصول تقسیم نمود، به این منظور ولتاژ خروجی بدون حضور محصول نیز اندازه‌گیری و از رابطه (۲) استفاده می‌شود:

$$\varepsilon_m = \frac{C}{C_0} = \frac{V_0}{V_0'} \times \frac{\sqrt{V_i'^2 + V_0'^2}}{\sqrt{V_i^2 + V_0^2}} \quad (\text{رابطه ۲})$$

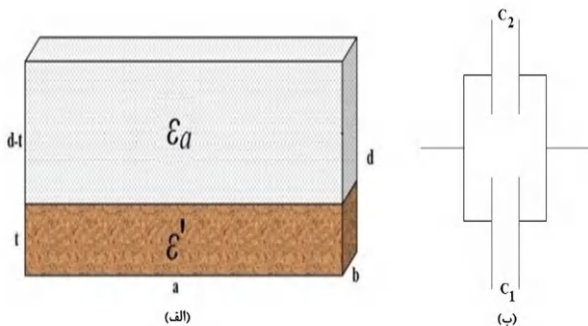
که در این رابطه مطابق شکل (۱)،  $\varepsilon_m$  ثابت دی‌الکتریک معادل و  $V_0'$  ولتاژ خروجی حسگر بدون حضور محصول می‌باشد (Soltani et al, 2011).

مقداری که از رابطه (۲) محاسبه می‌شود تحت تاثیر حضور هوا بین صفحات حسگر بوده و ثابت دی‌الکتریک محصول را نشان نمی‌دهد (Soltani et al, 2011) مطابق شکل (۲) قسمتی از این فضا را محصول و مابقی آن توسط هوا پر می‌شود. مقدار دی‌الکتریک اندازه‌گیری شده کمتر از محصول و بیش تر از هوا می‌باشد، این وضعیت را می‌توان به صورت دو خازن، یکی با

و مواد غذایی توسط محققان مختلف گزارش شده است (Dunlap & Makower, 1945; Nelson, 1965; Bengtsson & Rissman, 1971; Nelson & Stetson, 1976; Stuchly & Stuchly, 1980; Sokhansanj & Nelson, 1988; Kraszewski et al, 1998; Lawrence et al., 1998; Berbert et al., 2001; Kim et al., 2002; Boldor et al., 2004; Sacilik, et al, 2007; Ragni, et al, 2007; Sacilik, & Colak, 2010; Soltani, & Alimardani, 2011; Zhu, et al, 2012)، به عنوان نمونه Dunlap & Makower (1945) رابطه ثابت دی‌الکتریک و هدایت الکتریکی هویج را با ابعاد و رطوبت محصول، بسامد و دما در بسامد ۱۸ کیلوهرتز تا ۵ مگاهرتز مورد بررسی قرار دادند و گزارش نمودند که ثابت دی‌الکتریکی تا رطوبت ۸ درصد ثابت بود و سپس به سرعت رشد داشته است. Bengtsson & Rissman (1971) خواص دی‌الکتریکی بعضی از مواد غذایی مثل گوشت خام، ماهی، نخود فرنگی و غیره را در بسامد ۸/۲ مگاهرتز و در محدوده دمایی ۲۰- تا ۶۰ درجه سانتی‌گراد اندازه‌گیری کردند. نتایج نشان داد که این خواص به شدت تحت تاثیر ترکیبات شیمیایی، ابعاد و دمای محصول است. Stuchly & Stuchly (1980) اثر رطوبت و دما را بر خواص دی‌الکتریکی مواد گرانولی و در بسامد ۴/۹ گیگاهرتز بررسی کردند، در این مطالعه اثر دما بر مواد خشک ناچیز بود ولی در رطوبت‌های بالاتر اثر دما شدیدتر شد. Sacilik, et al (2007) اثر پارامترهای رطوبت، وزن مخصوص ظاهری و بسامد را بر خواص دی‌الکتریک گلرنگ را مورد مطالعه قرار دادند نتایج نشان دادند که با افزایش رطوبت و چگالی ظاهری خواص دی‌الکتریک دانه افزایش می‌یابد، در حالی که افزایش بسامد منجر به کاهش این خواص می‌گردد. Sacilik & Colak (2010) اثر پارامترهای مانند رطوبت، وزن مخصوص و بسامد بر خواص دی‌الکتریک دانه ذرت مورد بررسی قرار دادند، نتایج این مطالعه نشان داد که اگر چه کلیه این عوامل بر خواص دی‌الکتریکی دانه ذرت موثر هستند با این حال از بین این عوامل رطوبت نقش مهم‌ترین و موثرترین بر خواص دی‌الکتریکی ذرت دارد؛ همچنین معادلات درجه دوم و سوم را به منظور توصیف روابط موجود بین خواص دی‌الکتریک ذرت و این عوامل پیشنهاد دادند. Soltani & Alimardani (2011) با استفاده از یک خازن استوانه‌ای به بررسی اثر رطوبت بر ضریب دی‌الکتریک نخود و لوبیا چشم بلبلی در محدوده بسامد ۱ کیلوهرتز تا ۱ مگاهرتز پرداختند، نتایج این مطالعه نشان داد که در کلیه سطوح بسامد، ضریب دی‌الکتریکی رابطه نسبتاً قوی با رطوبت این دو محصول دارد، با این حال بهترین نتایج در بسامد یک مگاهرتز به دست آمد. Zhu, et al (2012) اثر رطوبت، بسامد و دما را بر خواص دی‌الکتریکی آرد شاه بلوط بررسی و گزارش نمودند که هر دو ثابت

از دیگر خواص مهم دی‌الکتریک محصولات کشاورزی می‌توان به هدایت الکتریکی اشاره نمود که به منظور اندازه‌گیری رطوبت به کار برده می‌شود (Jarimopas et al, 2005). میزان هدایت الکتریکی را می‌توان از رابطه (۸) محاسبه نمود (Nelson & Bartley, 2000):

$$\sigma = 2\pi f \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon'' \quad (\text{رابطه ۱۱})$$



شکل ۲- (الف): المانی از دی‌الکتریک بین صفحات حسگر شامل محصول و هوا، (ب): مدل جایگزین

### طراحی سیستم اندازه‌گیری

به دلیل پایداری زیاد و عدم اکسید شدن آلومینیوم، صفحات حسگر با استفاده از دو صفحه آلومینیومی به ضخامت ۲ میلی‌متر و براساس حسگر ساخته شده توسط Kumhala et al (2009) با اندکی تغییر به سبب تغییر نوع و میزان محصول عبور از بین صفحات حسگر با ابعاد ۸۰ در ۱۰ سانتی‌متر ساخته و به منظور عدم تماس با قسمت‌های دیگر با دو پروفیل نایلونی به ابعاد ۲۵ سانتی‌متر طول و به عرض و ضخامت ۲ سانتی‌متر در دو سمت یک نقاله به طول ۲ متر و با فاصله ۳۰ سانتی‌متر قرار داده شد (شکل ۳). جهت اندازه‌گیری ضریب دی‌الکتریک سامانه الکترونیکی مطابق شکل (۴) طراحی و ساخته شد.

در این سامانه با برقراری جریان از طریق مدار تغذیه، مولد موج فعال شده و یک جریان متناوب با موجی سینوسی را بر روی حسگر خازنی اعمال می‌کند، مقدار این جریان پس از گذشتن از حسگر با توجه به خصوصیات ماده دی‌الکتریک بین صفحات حسگر تغییر کرده و پس از یک سو شدن به میکروکنترلر فرستاده می‌شود، مقادیر محاسبه شده توسط میکروکنترلر پس از تبدیل به پروتکل RS-232 با استفاده از یک کانکتور ۹ پین به رایانه فرستاده شده و با استفاده از نرم افزار MATLAB 2011 بر حسب میلی ولت بر روی رایانه ذخیره می‌شود تا بعداً مورد تجزیه و تحلیل قرار گیرد.

دی‌الکتریک شلتوک و دیگری با دی‌الکتریک هوا که به صورت موازی به هم متصل هستند در نظر گرفت؛ ظرفیت معادل این خازن با توجه به روابط به هم بستن خازن‌ها در حالت موازی برابر است با:

$$C = C_1 + C_2 \quad (\text{رابطه ۳})$$

در نتیجه با توجه به شکل (۲) داریم:

$$\frac{\epsilon_0 \epsilon_m a d}{b} = \frac{\epsilon_0 \epsilon' a t}{b} + \frac{\epsilon_0 \epsilon_a a (d - t)}{b} \quad (\text{رابطه ۴})$$

با خلاصه کردن رابطه (۴) داریم:

$$\epsilon_m = \epsilon' \frac{t}{d} + \epsilon_a \frac{(d - t)}{d} \quad (\text{رابطه ۵})$$

اگر نسبت میزان محصول بین صفحات حسگر و کل فضای بین صفحات ( $\frac{t}{d}$ ) را  $v_1$  در نظر بگیریم در این صورت داریم:

$$\epsilon_m = v_1 \epsilon' + (1 - v_1) \epsilon_a \quad (\text{رابطه ۶})$$

بنابراین می‌توان ثابت دی‌الکتریک نسبی را به صورت زیر

محاسبه نمود:

$$\epsilon' = \frac{\epsilon_m - (1 - v_1) \epsilon_a}{v_1} \quad (\text{رابطه ۷})$$

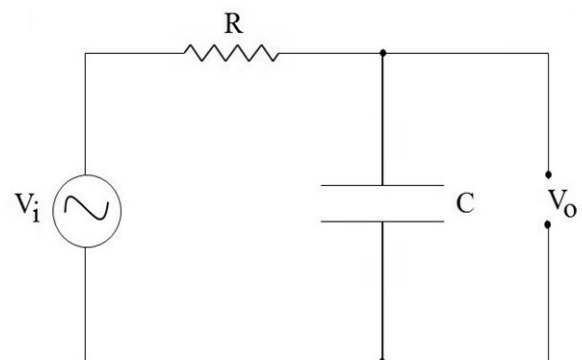
همچنین با استفاده تعریف اتلاف دی‌الکتریک داریم:

$$\tan \delta = \frac{\epsilon''}{\epsilon'} \quad (\text{رابطه ۸})$$

$$\tan \delta = \frac{1}{2\pi f R C} \quad (\text{رابطه ۹})$$

که در این رابطه  $\delta$  بیانگر اتلاف دی‌الکتریک می‌باشد

(Sacilik et al, 2006; Kitaneh et al, 2006).



شکل ۱- شماتیک ساده ای از یک حسگر خازنی

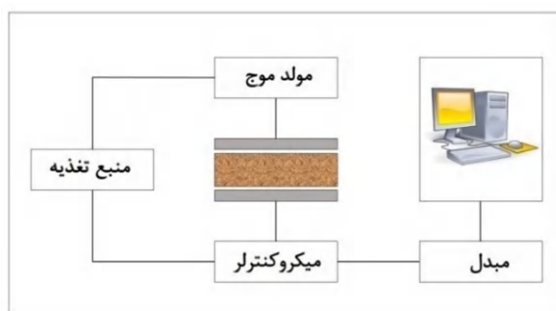
لذا با توجه به روابط (۸) و (۹) ثابت دی‌الکتریک اتلافی

برابر است با:

$$\epsilon'' = \frac{\epsilon'}{2\pi f R C} \quad (\text{رابطه ۱۰})$$



شکل ۳- سامانه طراحی شده در حین انجام آزمایش



شکل ۴- مدار اندازه گیری و ثبت ولتاژ خروجی خازن

بعد از رسیدن نمونه ها به سطوح رطوبتی مورد نظر، به منظور توزیع یکنواخت رطوبت در سراسر دانه، دانه‌ها برای مدت ۷۲ ساعت در دمای  $5 \pm 1^\circ\text{C}$  درجه سانتی‌گراد درون یخچال نگهداری شدند (Aydin, 2002). پس از متعادل سازی به منظور از بین بردن اثرات دما بر مقادیر اندازه‌گیری شده، نمونه‌ها در دمای اتاق ( $25^\circ\text{C}$ ) نگهداری (Taghinezhad et al, 2012) و قبل از انجام آزمایش‌ها از هر سطح رطوبت، سه نمونه تهیه و محتوای رطوبت نمونه‌ها براساس روش استاندارد وزنی به شماره S352.3 روش آون بر پایه خشک تعیین گردید. همچنین برای محاسبه حجم محصول بین صفحات حسگر جرم مخصوص حقیقی از روش جابه‌جایی مایع (تولونن غیر جاذب) استفاده شد تا فضای خالی مابین نمونه‌ها تعیین شده و از کاستن حجم توده از آن، حجم واقعی محاسبه شود و با تقسیم جرم توده به حجم واقعی، میزان چگالی حقیقی محاسبه شد (Mohsenin, 1986).

#### اندازه‌گیری خواص دی‌الکتریک و تحلیل داده‌ها

تغییرات خواص ولتاژ خروجی حسگر در ۴ سطح رطوبتی ۱۳، ۱۶، ۱۹ و ۲۲ درصد بر پایه خشک و ۴ بسامد ۱۰۰، ۳۰۰، ۵۰۰ و ۷۰۰ کیلوهرتز و ارقام قائم و پژوهش شلتوک در سه تکرار اندازه‌گیری و با استفاده از روابط (۳)، (۶) و (۷) به ترتیب میزان

#### آماده سازی نمونه ها

در این مطالعه ابتدا شلتوک ارقام قائم و پژوهش محصول سال زراعی ۹۱ از مزارع پژوهشکده ژنتیک و زیست‌فناوری طبرستان واقع در شهرستان ساری دریافت و دانه‌ها قبل از شروع آزمایش اندازه‌گیری، پاک و اجسام خارجی آن از قبیل خاک، پوشال و دانه‌های آسیب دیده جداسازی شد و با قرار دادن سه نمونه از آن‌ها در یک خشک‌کن آزمایشگاهی در درجه حرارت  $1 \pm 10.1^\circ\text{C}$  درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت و براساس روش استاندارد وزنی به شماره S352.3 رطوبت اولیه آن‌ها برپایه خشک محاسبه شد (ASAE, 1994).

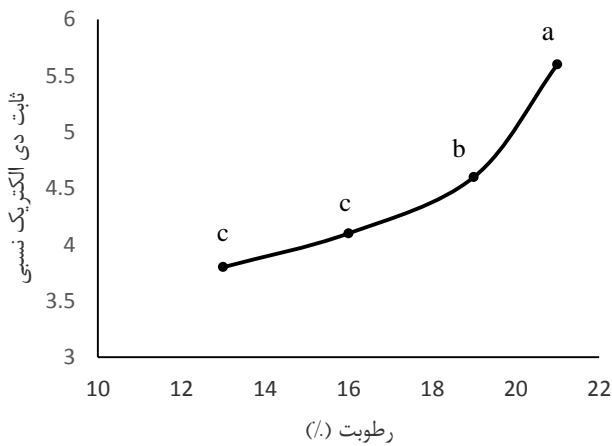
سپس برای رسیدن بذور به سطوح رطوبتی بالاتر مطابق رابطه (۱۲) مقدار کافی آب به دانه‌ها اضافه شد. (Balasubramanian, 2002)

$$Q = \frac{W_i(M_f - M_i)}{100 - M_f} \quad (\text{رابطه ۱۲})$$

در این رابطه، Q: جرم آب اضافه شده بر حسب کیلوگرم،  $W_i$ : جرم اولیه نمونه بر حسب کیلوگرم،  $M_i$ : محتوای رطوبتی اولیه نمونه بر پایه خشک،  $M_f$ : رطوبت نهایی نمونه بر پایه خشک می‌باشد.

اما بین ارقام مورد بررسی و اثرات متقابل این عامل با عوامل دیگر تفاوت معنی‌داری مشاهده شد؛ شکل (۵) اثر رطوبت بر ثابت دی‌الکتریک نسبی شلتوک را بر اساس مقایسه میانگین به روش دانکن نشان می‌دهد، همان‌گونه که مشاهده می‌شود تغییر محتوای رطوبتی نمونه‌ها از ۱۳٪ به ۱۶٪ تاثیر چندانی بر ثابت دی‌الکتریک نسبی شلتوک ندارد ولی با افزایش رطوبت به سطوح بالاتر ثابت دی‌الکتریک نسبی به سرعت رشد داشته و در رطوبت ۲۲٪ به بالاترین میزان خود می‌رسید. به نظر می‌رسد این روند تقریباً افزایشی ناشی از اثر ثابت دی‌الکتریک بالای آب (۸۰) نسبت به دیگر مواد به علت خاصیت دو قطبی ملکول‌های آب باشد (Deloor, 1968).

Dunlap & Makower (1945) نیز رابطه ثابت دی‌الکتریک و هدایت الکتریکی هویج را با ابعاد و رطوبت محصول، بسامد و دما روی در بسامد ۱۸ کیلوهرتز تا ۵ مگاهرتز مورد بررسی قرار دادند و گذارش نمودند که ثابت دی‌الکتریک تا رطوبت ۸ درصد ثابت بود و سپس به سرعت رشد داشته است. این روند در رابطه با افزایش ولتاژ خروجی حسگر با افزایش رطوبت نیشکر در محدوده رطوبتی ۶۵/۹۷ تا ۷۳/۲۸ درصد بر پایه تر نیز گزارش شده است (Taghinezhad et al, 2012).



شکل ۵- تغییرات ثابت دی‌الکتریک در اثر تغییرات رطوبت

نتایج مقایسه میانگین در شکل (۶) نشان داد که ثابت دی‌الکتریک نسبی شلتوک با افزایش بسامد ولتاژ ورودی سامانه اندازه‌گیری از ۱۰۰ کیلوهرتز به ۳۰۰ کیلوهرتز به علت کاهش قطبش دی‌الکتریک با افزایش بسامد (Scaife, 1998) به شدت کاهش می‌یابد اما با افزایش بسامد به سطوح بالاتر از شدت کاهش کاسته شده و در نهایت به یک مقدار تقریباً ثابت می‌رسد.

ثابت دی‌الکتریک نسبی ( $\epsilon'$ ) و اتلافی ( $\epsilon''$ ) و همچنین هدایت الکتریکی ( $\sigma$ ) محاسبه و به روش فاکتوریل و در قالب طرح کاملاً تصادفی بررسی گردید. سپس نمونه‌ها ابتدا به شیوه کاملاً تصادفی به دو دسته کالیبراسیون (شامل  $\frac{2}{3}$  کل نمونه‌ها) و آزمون (شامل  $\frac{1}{3}$  کل نمونه‌ها) تقسیم شدند (Liu et al., 2004). از دسته داده‌های کالیبراسیون برای مدل‌سازی رابطه بین خواص دی‌الکتریک محصول با رطوبت در بسامدهای مختلف و از دسته داده‌های آزمون، به منظور اعتبارسنجی و تعیین قدرت پیش‌بینی مدل استفاده شد. در این تحقیق، برای مدل‌سازی از روش رگرسیون خطی چند متغیره (MLR) استفاده شد. در این روش، ابتدا از مقادیر خواص دی‌الکتریک در بسامدهای مختلف به عنوان ورودی (متغیر مستقل) برای مدل‌سازی و برآورد رطوبت (متغیر وابسته) استفاده گردید. پارامترهای آماری برای ارزیابی مدل شامل مقادیر ضریب تبیین در دو مرحله کالیبراسیون ( $R_c^2$ ) و آزمون ( $R_p^2$ )، ریشه میانگین مربعات خطای کالیبراسیون (RMSEC) و آزمون (RMSEP) و نسبت انحراف استاندارد (SDR) می‌باشد. SDR بهترین پارامتر در ارزیابی قابلیت پیشگویی مدل‌های رگرسیون محسوب می‌شود که با تقسیم انحراف استاندارد مقادیر رطوبت در دسته آزمون بر میانگین مربعات خطای پیش‌بینی به دست می‌آید (Mireei et al., 2013). تفسیر این پارامتر بین محققین متفاوت است ولی آن چه که به طور کلی قابل قبول است این است که زمانی که مقدار SDR کمتر از ۱/۵ باشد پیش‌بینی مدل ضعیف است و اگر بین ۱/۵ تا ۲ باشد پیش‌بینی قابل قبول است و اگر بیش از ۲ باشد پیش‌بینی کاملاً مناسب بوده است (Summers et al., 2011).

از نرم‌افزار Excel 2013 جهت انجام محاسبات و رسم نمودار استفاده شد و داده‌های حاصل از پژوهش به کمک نرم افزارهای SAS 9.2 و Unscrambler X10.3 مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. همچنین در طی آزمایش با استفاده از یک اینورتر سرعت نقله بر روی  $1 \text{ m.s}^{-1}$  کیلوهرتز ثابت شد.

## نتایج و بحث

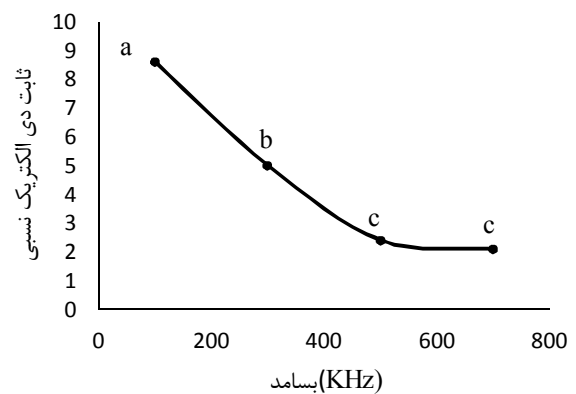
### ثابت دی‌الکتریک نسبی

خلاصه نتایج تجزیه واریانس حاصل از واریانس مربوط به تاثیر میزان رطوبت، بسامد و رقم بر ثابت دی‌الکتریک نسبی شلتوک در جدول (۱) ارائه شده است. مطابق این نتایج اثر رطوبت و بسامد بر این شاخص در سطح احتمال ۱٪ معنی‌دار است، همچنین اثر متقابل این دو عامل تاثیر معنی‌داری در سطح احتمال ۵٪ بر ثابت دی‌الکتریک نسبی شلتوک نشان می‌دهد؛

جدول ۱- نتایج تجزیه واریانس مربوط به تاثیر عوامل مورد بررسی بر ثابت دی الکتریک نسبی

منابع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات	F
رطوبت	۳	۱۴/۶۹۳	۷۹/۰۹**
بسامد	۳	۲۲۲/۷۱۶	۱۲۰/۰۳۵**
رطوبت × بسامد	۹	۰/۴۶۰	۲/۴۸*
رقم	۱	۰/۲۴۶	۱/۳۲ <sup>ns</sup>
رطوبت × رقم	۳	۰/۴۴۷	۲/۴۱ <sup>ns</sup>
بسامد × رقم	۳	۰/۳۹۷	۲/۱۴ <sup>ns</sup>
رطوبت × بسامد × رقم	۹	۰/۳۵۹	۱/۹۴ <sup>ns</sup>
خطای آزمایش	۶۴	۰/۱۸۶	

\*\* معنی دار در سطح احتمال ۱٪



شکل ۶- تغییرات ثابت دی الکتریکی در اثر تغییرات بسامد ولتاژ ورودی سامانه اندازه گیری

این روند کاهش در مطالعه دیگری که در رابطه با تاثیر بسامد بر خواص دی الکتریکی ارقام مختلف گندم قرمز زمستانه با رطوبت ۲/۷٪ تا ۲۳/۸٪ بر پایه تر و در محدوده بسامد ۲۵۰

هرتز تا ۱۲/۱ گیگاهرتز (Nelson & Stetson, 1976) نیز گزارش شده است.

بر طبق نتایج مقایسه میانگین اثر متقابل رطوبت و بسامد ولتاژ ورودی که در شکل (۷) نشان داده شده است، به نظر می رسد اثر افزایشی رطوبت بر ثابت دی الکتریک نسبی تا حد زیادی به وسیله اثر کاهش بسامد به خصوص در سطوح بالای بسامد خنثی می گردد لذا در سطوح بالای بسامد در کلیه سطوح رطوبت تفاوت قابل ملاحظه ای بین تیمارها مشاهده نمی گردد.

برازش داده های حاصل به صورت یک رابطه درجه سوم (Berbert et al, 2002) بین رطوبت محصول (M) با ثابت دی الکتریک نسبی (ε') در سطوح مختلف بسامد به صورت زیر است:

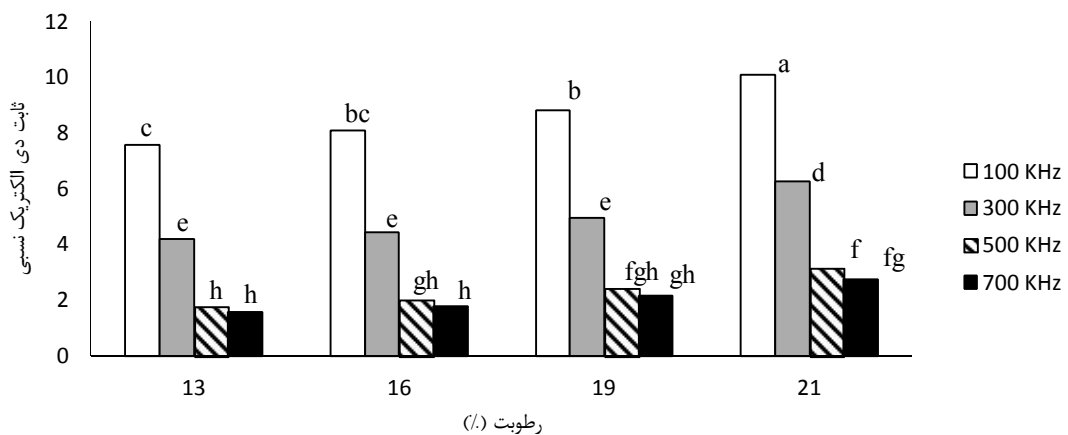
$$M_{(100KHz)} = 0.0274\varepsilon'^3 - 1.2433\varepsilon'^2 + 18.884\varepsilon' - 87.7 \quad (\text{رابطه ۱۳})$$

$$M_{(300KHz)} = 0.0258\varepsilon'^3 - 1.1655\varepsilon'^2 + 17.562\varepsilon' - 83.747 \quad (\text{رابطه ۱۴})$$

$$M_{(500KHz)} = -0.0096\varepsilon'^3 + 0.4966\varepsilon'^2 - 8.188\varepsilon' + 45.521 \quad (\text{رابطه ۱۵})$$

$$M_{(700KHz)} = -0.0057\varepsilon'^3 + 0.2927\varepsilon'^2 - 4.7915\varepsilon' + 26.947 \quad (\text{رابطه ۱۶})$$

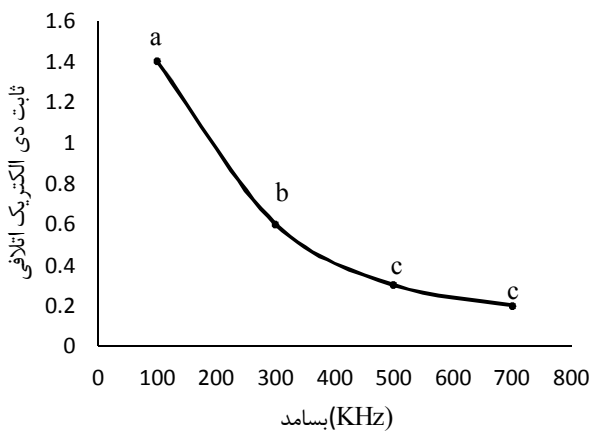
جدول (۲) نتایج مدل سازی با ثابت دی الکتریک نسبی را به طور خلاصه نشان می دهد، همان طور که مشاهده می شود، مقادیر نسبت انحراف استاندارد (SDR) به دست آمده نشان از توانایی خوب این پارامتر در برآورد رطوبت شلتوک در کلیه سطوح بسامد دارد.



شکل ۷- تاثیر اثر متقابل رطوبت و بسامد ولتاژ ورودی بر ثابت دی الکتریک نسبی

جدول ۲- نتایج مدل سازی ضریب دی الکتریک نسبی

آزمون			کالیبراسیون		فرکانس استفاده شده (KHz)
SDR	RMSEP	R <sup>2</sup> <sub>p</sub>	RMSEC	R <sup>2</sup> <sub>c</sub>	
۱/۷۱۸	۱/۱۲۰	۰/۸۵۹	۰/۵۸۶	۰/۹۴۸	۱۰۰
۱/۹۵۶	۱/۰۷۹	۰/۷۸۸	۰/۴۶۲	۰/۹۵۹	۳۰۰
۲/۱۵۷	۱/۰۰۷	۰/۸۲۸	۰/۴۲۵	۰/۹۶۴	۵۰۰
۲/۰۶۵	۱/۰۰۵	۰/۸۴۴	۰/۴۶۱	۰/۹۶۰	۷۰۰



شکل ۹- نمودار اثر بسامد ولتاژ ورودی بر ثابت دی الکتریکی اتلافی شلتوک

نتایج مقایسه میانگین در شکل (۱۰) نشان می‌دهد که در کلیه سطوح رطوبت تفاوت معنی دار تنها در بسامد ۱۰۰ کیلوهرتز مشاهده می‌گردد و بین سطوح دیگر بسامد از نظر ثابت دی الکتریکی اتلافی اختلاف معنی داری مشاهده نمی‌شود.

جدول ۳- نتایج تجزیه واریانس مربوط به تاثیر عوامل مورد بررسی بر ثابت دی الکتریکی اتلافی

F	میانگین مربعات	درجه آزادی	منابع تغییرات
۶/۸۰**	۰/۳۱۵	۳	رطوبت
۱۴۰/۷۴**	۶/۵۱۷	۳	بسامد
۳/۴۰**	۰/۱۵۸	۹	رطوبت × بسامد
۰/۴۱ <sup>ns</sup>	۰/۰۱۹	۱	رقم
۰/۴۳ <sup>ns</sup>	۰/۰۲۰	۳	رطوبت × رقم
۰/۴۰ <sup>ns</sup>	۰/۰۱۸	۳	بسامد × رقم
۰/۲۴ <sup>ns</sup>	۰/۰۱۱	۹	رطوبت × بسامد × رقم
	۰/۰۴۶	۶۴	خطای آزمایش

\*\* معنی دار در سطح احتمال ۱٪

همچنین برازش داده‌های حاصل به صورت یک رابطه درجه سوم (Berbert et al, 2002) بین رطوبت محصول (M) با ثابت دی

الکتریکی اتلافی (ε'') در سطوح مختلف بسامد به صورت:

$$M_{(100KHz)} = -0.428\varepsilon''^3 + 11.285\varepsilon'' + 1.44 \quad (\text{رابطه } ۱۷)$$

$$(\text{رابطه } ۱۸)$$

$$M_{(300KHz)} = 1.260 \times 10^3 \varepsilon''^3 - 1.150 \times 10^3 \varepsilon''^2 + 155.971$$

$$M_{(500KHz)} = 10.928\varepsilon''^2 + 20.679\varepsilon'' + 8.268 \quad (\text{رابطه } ۱۹)$$

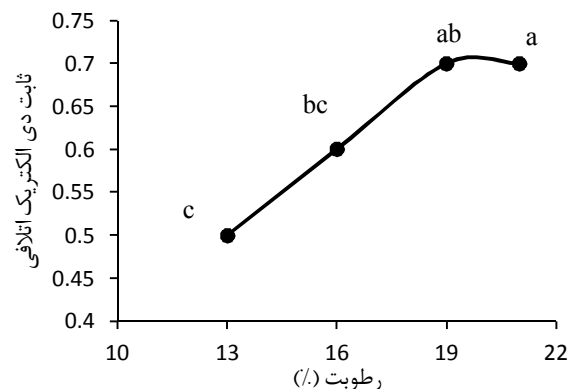
$$M_{(700KHz)} = 269.45\varepsilon''^3 + 111.913\varepsilon''^2 + 6.959 \quad (\text{رابطه } ۲۰)$$

مطابق نتایج مدل‌سازی رطوبت با ثابت دی الکتریکی اتلافی (ε'') که به صورت خلاصه در جدول (۴) ارائه شده است،

### ثابت دی الکتریکی اتلافی

جدول (۳) نتایج تجزیه واریانس مربوط به تاثیر میزان رطوبت، بسامد و رقم و اثرات متقابل این عوامل را بر ثابت دی الکتریکی اتلافی شلتوک نشان می‌دهد. همانگونه که مشاهده می‌شود اثر عوامل رطوبت، بسامد ولتاژ ورودی و اثر متقابل این دو عامل تاثیر معنی داری را بر ثابت دی الکتریکی نشان می‌دهد.

شکل (۸) بیانگر تغییرات بین ثابت دی الکتریکی اتلافی و رطوبت محصول می‌باشد، مطابق شکل با افزایش رطوبت از ۱۳٪ تا ۱۹٪ ثابت دی الکتریکی اتلافی نیز تقریباً با یک روند خطی افزایش می‌یابد اما افزایش رطوبت از ۱۹٪ به ۲۱٪ تاثیر معنی داری بر این شاخص ندارد، زیرا با افزایش رطوبت محصول نسبت آب آزاد به آب مقید موجود در آن افزایش می‌یابد و از آنجا که آب آزاد محصول در مقایسه با آب مقید تمایل بیشتری به قطبش دی الکتریکی دارد، این افزایش قطبش منجر به کند شدن روند افزایشی ثابت دی الکتریکی اتلافی می‌گردد (Sun, 2012). رفتار مشابهی از لوبیا در محدوده رطوبت ۱۱/۵٪ تا ۲۱٪ (Berbert et al, 2002) و دانه‌های کتان در ۵/۹۲٪ تا ۲۲/۱۸٪ (Sacilik et al, 2006) نیز گزارش شده است.



شکل ۸- نمودار اثر رطوبت بر ثابت دی الکتریکی اتلافی شلتوک

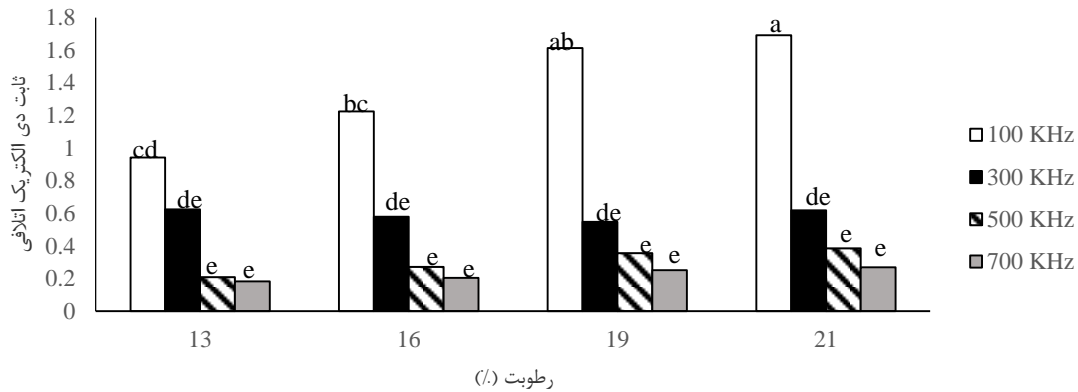
همان‌طور که در شکل (۹) نشان داد تغییرات ثابت دی الکتریکی اتلافی شلتوک، مشابه تغییرات ثابت دی الکتریکی نسبی، افزایش بسامد ولتاژ ورودی از ۱۰۰ کیلوهرتز به ۳۰۰ کیلوهرتز موجب کاهش شدید ثابت دی الکتریکی اتلافی شده و با افزایش بسامد به سطوح بالاتر از شدت کاهش کاسته شده و در نهایت به یک مقدار تقریباً ثابت می‌رسد این روند تقریباً کاهشی که به نظر می‌رسد ناشی از اثرات ماکسول-واگنر (Nelson & Stetson, 1976) باشد در مورد گندم قرمز زمستانه (Lawrence et al, 1998) در محدوده بسامدی ۱ تا ۱۱۰ گیگاهرتز و دانه‌های گلرنگ (Sacilik et al, 2006) در محدوده بسامدی ۵۰ کیلوهرتز تا ۱۰ مگاهرتز گزارش شده است.

مورد بررسی بر هدایت الکتریکی شلتوک را نشان می‌دهد. بر طبق نتایج به دست آمده تنها اثر رطوبت و بسامد در سطح احتمال ۱٪ بر هدایت الکتریکی معنی‌داری است و تفاوت میان ارقام مورد بررسی و اثرات متقابل عوامل، هیچ تاثیر بر هدایت الکتریکی ندارد.

تنها بسامدهای ۱۰۰ KHz و ۷۰۰ KHz در سطح قابل قبولی قادر به پیش‌بینی رابطه بین رطوبت و ثابت دی الکتریک اتلافی می‌باشد.

### هدایت الکتریکی

جدول (۵) خلاصه نتایج تجزیه واریانس حاصل از تاثیر عوامل



شکل ۱۰- نمودار اثر متقابل رطوبت و بسامد ولتاژ ورودی بر ثابت دی الکتریک اتلافی شلتوک

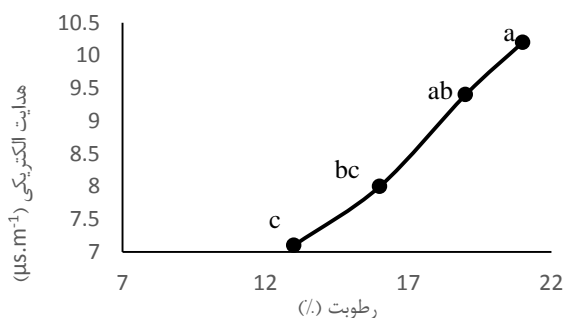
جدول ۴- نتایج مدل‌سازی ضریب دی الکتریک اتلافی

آزمون			کالیبراسیون		فرکانس استفاده شده (KHz)
SDR	RMSEP	$R_p^2$	RMSEC	$R_c^2$	
۱/۶۱۵	۱/۱۴۱	۰/۷۹۸	۰/۵۷۹	۰/۹۵۷	۱۰۰
۰/۳۲۶	۳/۳۰۷	۰/۷۰۳	۱/۲۳۶	۰/۹۴۳	۳۰۰
۰/۶۳۹	۲/۱۵۱	۰/۲۵۲	۱/۲۳۳	۰/۸۲۱	۵۰۰
۲/۲۷۴	۰/۸۵۴	۰/۹۴۴	۰/۴۵۱	۰/۹۷۶	۷۰۰

جدول ۵- نتایج تجزیه واریانس مربوط به تاثیر عوامل مورد بررسی بر هدایت الکتریکی

F	میانگین مربعات	درجه آزادی	منابع تغییرات
۱۰/۵۱**	۴۶/۷۵۸	۳	رطوبت
۴/۷۹**	۲۱/۳۱۴	۳	بسامد
۱/۷۳ <sup>ns</sup>	۷/۶۸۳	۹	رطوبت × بسامد
۰/۱۰ <sup>ns</sup>	۰/۳۶۲	۱	رقم
۰/۳۷ <sup>ns</sup>	۱/۶۶۲	۳	رطوبت × رقم
۰/۹۶ <sup>ns</sup>	۴/۲۷۰	۳	بسامد × رقم
۰/۴۳ <sup>ns</sup>	۱/۸۴۹	۹	رطوبت × بسامد × رقم
	۴/۴۵۱	۶۴	خطای آزمایش

\*\* معنی دار در سطح احتمال ۱٪



شکل ۱۱- نمودار اثر رطوبت بر هدایت الکتریکی شلتوک

شکل (۱۱) اثر رطوبت بر هدایت الکتریکی شلتوک را براساس مقایسه میانگین به روش دانکن نشان می‌دهد، مطابق شکل با افزایش رطوبت میزان هدایت الکتریکی نیز با آهنگی تقریباً یکنواخت افزایش می‌یابد.

همچنین بر طبق نتایج مقایسه میانگین اثر بسامد ولتاژ ورودی بر هدایت الکتریکی شلتوک که در شکل (۱۲) نشان داده شده است.



و بسامد منجر به افزایش هدایت الکتریکی می‌گردد، اما رطوبت تاثیر به مراتب بیشتری نسبت به بسامد بر افزایش هدایت الکتریکی شلتوک دارد.

برازش داده‌های حاصل به صورت یک رابطه درجه سوم بین رطوبت محصول (M) و هدایت الکتریکی ( $\sigma$ ) در سطوح مختلف بسامد به صورت زیر می‌باشد:

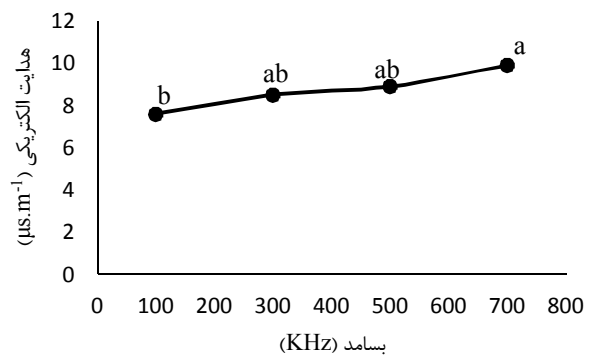
$$M_{(100\text{KHz})} = -0.002\sigma^3 + 2.03\sigma + 1.44 \quad (\text{رابطه ۲۱})$$

$$M_{(300\text{KHz})} = 0.271\sigma^3 - 4.133\sigma^2 + 155.971 \quad (\text{رابطه ۱۳})$$

$$M_{(500\text{KHz})} = 0.014\sigma^2 + 0.744\sigma + 8.268 \quad (\text{رابطه ۱۴})$$

$$M_{(700\text{KHz})} = 0.006\sigma^3 + 0.241\sigma + 10.001 \quad (\text{رابطه ۱۵})$$

جدول (۶) نتایج مدل‌سازی با ثابت دی الکتریک نسبی ( $\sigma$ ) را به طور خلاصه نشان می‌دهد، همانطور که مشاهده می‌شود، مقادیر نسبت انحراف استاندارد (SDR) بدست آمده نشان می‌دهد که تنها بسامدهای ۱۰۰KHz و ۷۰۰KHz در سطح قابل قبولی قادر به پیش‌بینی رابطه بین رطوبت و هدایت الکتریکی محصول می‌باشد.



شکل ۱۲- نمودار اثر بسامد ولتاژ ورودی بر هدایت الکتریکی شلتوک

هر چند افزایش بسامد منجر به افزایش هدایت الکتریکی شلتوک می‌شود اما تنها بین دو تیمار ۱۰۰ کیلوهرتز و ۷۰۰ کیلوهرتز تفاوت معنی‌داری از نظر هدایت الکتریکی در سطح ۰.۵٪ وجود دارد، به نظر می‌رسد مطابق نتایج دیگر مطالعات صورت گرفته در رابطه با تاثیر رطوبت ۵/۹۲٪ تا ۲۲/۱۸٪ بر پایه خشک و بسامد ۵۰ کیلوهرتز تا ۱۰ مگاهرتز بر خواص دی‌الکتریکی دانه کتان (Sacilik et al, 2007) هر چند افزایش هر دو عامل رطوبت

جدول ۶- نتایج مدل‌سازی هدایت الکتریکی

آزمون	کالیبراسیون			فرکانس استفاده شده (KHz)	
	RMSEP	R <sub>p</sub> <sup>2</sup>	RMSEC		R <sub>c</sub> <sup>2</sup>
SDR					
۱/۶۱۵	۰/۵۷۹	۰/۷۹۸	۰/۵۷۹	۰/۹۵۷	۱۰۰
۰/۰۹۷	۳/۳۸۷	۰/۶۲۹	۲/۰۳۰	۰/۴۷۰	۳۰۰
۰/۲۳۵	۱/۸۸۶	۰/۹۲۶	۱/۸۸۶	۰/۴۶۲	۵۰۰
۱/۵۸۷	۱/۱۹۰	۰/۹۰۴	۰/۵۷۰	۰/۹۷۳	۷۰۰

معنی‌داری بر ثابت دی‌الکتریک نسبی و اتلافی شلتوک دارند. همچنین مدل‌های MLR توانستند رابطه بین رطوبت با ثابت دی‌الکتریک نسبی را در کلیه سطوح بسامد و رطوبت با ثابت دی‌الکتریک اتلافی و هدایت الکتریکی را در بسامدهای ۱۰۰KHz و ۷۰۰KHz با دقت قابل قبولی پیش‌بینی نماید. انجام تحقیقاتی از این دست می‌تواند در طراحی سامانه برخط جهت اندازه‌گیری رطوبت شلتوک در طی فرآیند برداشت، فرآوری و انبارداری موثر باشد. هرچند نیاز به مطالعات بیشتر در سطوح دیگر رطوبت و بسامد و ارقام دیگر شلتوک احساس می‌شود.

## REFERENCES

ASAE Standards. (1994). S352.2. Moisture measurement ungrounded grains and seeds. St. Joseph, MI, ASAE.

Aydin, C., Ogut, H. & Konak, M. (2002). Some physical properties of Turkish Mahaleb. *Biosystems Engineering*, 82(3), 231-234.

## نتیجه‌گیری

در این تحقیق به بررسی تاثیر رطوبت، بسامد ولتاژ ورودی سامانه اندازه‌گیری و رقم بر خواص دی الکتریکی شلتوک در پرداخته شد، نتایج آزمایش‌ها نشان دادند که بین ارقام مورد بررسی (قائم و پژوهش) از نظر خواص دی‌الکتریکی آن‌ها تفاوت معنی‌داری وجود ندارد، رطوبت بر کلیه خواص مورد بررسی اثری معنی‌دار و افزایشی دارد و افزایش بسامد ولتاژ ورودی هر چند منجر به افزایش هدایت الکتریکی شلتوک می‌گردد اما اثر معکوسی بر ثابت دی‌الکتریک نسبی و اتلافی آن دارد. در بین اثرات متقابل این عوامل تنها اثر متقابل رطوبت و بسامد تاثیر

Bengtsson, N. E. & Rissman, P.O. (1971). Dielectric property of food at 3 GHz as determined by a cavity perturbation technique. *Journal of Microwave power*, 6(2), 107-123.

Berbert, P. A., Queiroz, D. M., Sousa, E. F., Molina, M. B., Melo, E. C. & Faroni, L. R. D. (2001).

- Dielectric properties of parchment coffee. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 80(1), 65-80.
- Berbert, P. A., Queiroz, D.M. & Melo, E.C. (2002). Dielectric properties of common bean. *Biosystems Engineering*, 83(4), 449-462.
- Boldor, D., Sanders, T. H. & Simunovic. J. (2004). Dielectric properties of in-shell and shelled peanuts at microwave frequencies. *Transactions of the ASAE*, 47(4), 1159-1169.
- Debye, P. (1929). *Polar Molecules*, Dover Publication, Inc., New York, 60.
- Deloor, G. P. (1968). Dielectric properties of heterogeneous mixtures containing water. *Journal of Microwave Power*, 3 (2), 67.
- Dunlap, W. C. & Makower, B. (1945). Radio frequency dielectric properties of dehydrated carrots. *Journal of Physical Chemistry*, 49(6), 601-621.
- Gradinarsky, L., Brage, H., Lagerholm, B., Björn, I. & Folestad, S. (2006). In situ Monitoring and Control of Moisture Content in Pharmaceutical Powder Processes using an Open-ended Coaxial Probe. *Measurement Science and Technology*, 17, 1847-1853.
- Jarimopas, B., Nunak, T. & Nunak, N. (2005). Electronic device for measuring volume of selected fruit and vegetables. *Postharvest Biology and Technology*, 35, 25-31.
- Jha, S. N. (2011). *Nondestructive evaluation of food quality, Theory and Practice*. Berlin: Springer.
- Kim, K. B., Kim, J. H., Lee, S. S. & Noh, S. H. (2002). Measurement of grain moisture content using microwave attenuation at 10.5GHz and moisture density. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 51(1), 72-77
- Kitaneh, R. M. L., Saleh, A. M. & Gould, R. D. (2006). Ac electrical parameters of Al-ZnPc-Al organic semiconducting films. *Central European Journal of Physics*, 1(4), 87-104.
- Kraszewski, A., Trabelsi, S., & Nelson S. (1998). Moisture Content Determination in Grain by Measuring Microwave Parameters. *Measurement Science and Technology*, 8, 857-863.
- Kumhala, F., Kviz, Z., Kmoch, J. & Prosek. V. (2007). Dynamic laboratory measurement with dielectric sensor for forage mass flow determination. *Research in Agricultural Engineering*, 53(4), 149-154
- Kumhala, F., Prosek, V. & Blahovec. J. (2009). Capacitive throughput sensor for sugar beets and potatoes. *Biosystems engineering*, 102, 36-43.
- Lawrence, K. C., W. R. Windham, W. R. & Nelson, S. O. (1998). Wheat moisture determination by 1 to 110 MHz swept frequency admittance measurements. *Transactions of the ASAE*, 41 (1), 135-142.
- Liu, Y., Yang, Y. & FU, X. (2005). Prediction of valid acidity in intact apples with Fourier transform near infrared spectroscopy. *Journal of Zhejiang University SCIENCE*, 6B (3), 158-164.
- Mireei, S. A., Mohtasebi, S. S., Massudi, R., Rafiee, S. & Arabanian, A. S. (2010). Feasibility of a near infrared spectroscopy for analysis of date fruits. *International Agrophysics*, 24, 351-356.
- Mohsenin, N. N. (1986). *Physical Properties of Plant and Animal Materials* (revised 2nd Ed.). New York, *Gordon and Breach Science Publications*.
- Nelson, S. O. & Bartley, J. P. G. (1998). Measuring dielectric properties of hard red winter wheat from 1 to 350MHz with a flow-through coaxial sample holder. *Transactions of the ASAE*, 41(1), 143-150.
- Nelson, S. O. & Bartley, J. P. G. (2000). Measuring frequency-and temperature dependent dielectric properties of food materials. *Transactions of the ASAE*, 43(6), 1733-1736.
- Nelson, S. O. (1965). Dielectric properties of grain and seed in the 1 to 50-mc range. *Transactions of the ASAE*, 8(1), 38-48.
- Nelson, S. O. (1999). Dielectric properties measurement techniques and applications. *Transactions of the ASAE*, 42 (2), 523-529.
- Nelson, S. O. (2005). Dielectric spectroscopy in agriculture. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 351, 2940-2944.
- Nelson, S. O. (2006). Agricultural applications of dielectric measurements. *IEEE Transactions on dielectrics and Electrical Insulation*, 16, 688-702.
- Nelson, S. O. (2008). Dielectric properties of agricultural products and some applications. *Research in Agricultural Engineering*, 54, 104-112.
- Nelson, S. O., Stetson, L. E. (1976). Frequency and Moisture Dependence of the Dielectric Properties of Hard Red Winter Wheat. *Journal Agricultural Engineering Research*, 21, 181-192.
- Ragni, L., Al-Shami, A., Mikhaylenko, G. & Tang, A. (2007). Dielectric characterization of hen eggs during storage. *Journal of Food Engineering*, 82, 450-459.
- Sacilik, K. & Colak, A. (2010). Determination of dielectric properties of corn seeds from 1 to 100 MHz. *Powder Technology*, 203, 365-370.
- Sacilik, K., Tarimci, C. & Colak, A. (2007). Moisture content and bulk density dependence of dielectric properties of safflower seed in the radio frequency range. *Journal of Food Engineering*, 78, 1111-1116.
- Sacilik, K., Tarimci, C. & Colak, A. (2006). Dielectric Properties of Flaxseeds as affected by Moisture Content and Bulk Density in the Radio Frequency Range. *Biosystems Engineering*, 93 (2), 153-160.
- Scaife, B. K. P. (1998). *Principles of Dielectrics*. London. Oxford University Press.
- Sokhansanj, S. & Nelson, S. O. (1988). Dependence of dielectric properties of whole-grain wheat on bulk density. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 39(3), 173-179.
- Soltani, M. & Alimardani, R. (2011). Moisture-Dependent Dielectric Properties of Pea and

- Black-Eyed Pea. *Journal of American Science*, 7(4), 60-64.
- Soltani, M., Alimardani, R. & Omid, M. (2011). A Feasibility Study of Employing a Capacitance Based Method in Banana Ripeness Recognition. *Iranian Journal of Biosystems Engineering*, 42(1), 21-27. (In Farsi)
- Stuchly, M. A., & Stuchly, S. S. (1980). Coaxial Line Reflection Method for Measuring Dielectric Properties of Biological Substances at Radio and Microwave Frequencies - A Review. *IEEE Trans, on Inst and Meas, IM-29*, 176-183.
- Summers, D., Lewis, M., Ostendorf B. & Chittleborough, D. (2011). Visible near-infrared reflectance spectroscopy as a predictive indicator of soil properties. *Ecol. Indic*, 11, 123-131.
- Sun, D. W. (2012). *Thermal Food Processing: New Technologies and Quality Issues*. (2th ed.). Boca Raton, Florida. CRC Press.
- Taghinezhad, J., Alimardani, R. & Jafari, A. (2012). Development of a Capacitive Sensing Device for Prediction of Water Content in Sugarcane Stalks. *International Journal of Advanced Science and Technology*, 44, 61-68.
- Venkatesh, M. S. & Raghavan G. S. V. (2005). An overview of dielectric properties measuring techniques. *Canadian Biosystems Engineering*, 47(7), 15-30.
- Zhu, X., Guo, W., Wu, X. & Wang, S. (2012). Dielectric properties of chestnut flour relevant to drying with radio-frequency and microwave energy. *Journal of Food Engineering*, 113, 143-150.