

# بررسی فیزیک جرقه فلزات در اجاق مایکروفر

لیلا مشهدی<sup>i</sup>، غلامرضا شایگان راد<sup>ii</sup>

## چکیده

در این مقاله، فیزیک جرقه فلزات در اجاق مایکروفر به صورت تئوری و تجربی بررسی شده است. پس از تعیین مشخصه‌های امواج و مدهای قابل تشدید در کاواک مایکروفر، پدیده جرقه الکتریکی از دو دیدگاه میدان الکتروستاتیک و متناوب مطالعه شده است. با حل معادله لاپلاس در مختصات بیضوی و قطبی به صورت تحلیلی، شدت میدان الکتریکی در نقاط مختلف اطراف قرص رسانا و نقاط تیز فلز به دست آمده است. آزمایش‌هایی با سیم‌های مختلف فلزی (از نظر جنس و ضخامت) و CD-ROM انجام شده است. نتایج به دست آمده از آزمایش‌های تجربی با نتایج تئوری همخوانی خوبی نشان می‌دهند.

## کلمات کلیدی

مایکروفر، جرقه فلزات، میکروموج، CD-ROM

## *Physical Investigation of Sparking of Metals Within Microwave Oven*

Mashhadi M., Shayeganrad G.

### ABSTRACT

By taking into account the electrostatic and alternating fields, the physics of sparking of metals within microwave oven has investigated. The characteristics of electromagnetic waves (TE and TM) and resonant modes in the cavity of microwave oven are determined. With analytical solving Laplace equation in spherical and elliptical coordinate, the magnitude of electric-field around a metal disk and sharp edge is determined. Experimental examples are given for some kind metal rings, wires and CD-ROM, showing a good agreement with the theoretical predictions.

### KEYWORDS

Microwave oven, sparking of metals, microwave, CD-ROM

مختلف از دو دیدگاه میدان الکتریکی ثابت و متغیر مطالعه شده است. با حل معادله لاپلاس به صورت تحلیلی، شدت میدان الکتریکی در نقاط مختلف اطراف قرص رسانا و نقاط تیز فلز به دست آمده است. با تعیین تقریبی جریان‌های سطحی در قرص و حلقه رسانا، توان اتلافی و تغییر دمای ناشی از اتلاف توان نیز محاسبه شده است.

در نتایج تئوری به دست آمده، از تغییر شکل امواج الکترومغناطیسی بعد از ورود رسانا به داخل مایکروفر صرف نظر شده است. به دلیل سریع بودن مکانیزم جرقه و همچنین بسامد بالای امواج میکروموج، از اتلاف توان گرمایی به

### ۱- مقدمه

تا کنون آزمایش‌های بی‌شماری در زمینه تأثیر امواج داخل مایکروفر بر مواد و اشیای مختلف انجام شده که تعدادی از آنها در زمینه تأثیر امواج میکروموج بر اشیای فلزی داخل مایکروفر بوده است [۱]-[۳]. با این وجود، از نظر فیزیکی بررسی‌های دقیقی در این زمینه انجام نشده است. در این مقاله، به منظور بررسی فیزیک جرقه فلزات در اجاق مایکروفر، ابتدا فیزیک کار مایکروفر بررسی و سپس تأثیر امواج میکروموج بر فلزات داخل مایکروفر در حالت‌های

<sup>i</sup> دانشجوی دکتری دانشکده فیزیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران [mozghan\\_mhd@yahoo.com](mailto:mozghan_mhd@yahoo.com)

<sup>ii</sup> دانشجوی دکتری دانشکده فیزیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران [shayeganrad@yahoo.com](mailto:shayeganrad@yahoo.com)

صورت رسانش به محیط اطراف فلز نیز چشم پوشی شده

$$H_z = H_{mnp} \cos\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \cos\left(\frac{n\pi y}{b}\right) \sin\left(\frac{p\pi z}{d}\right) \quad (3-3)$$

که  $m=0, 1, 2, \dots$ ،  $n=0, 1, 2, \dots$  و  $p=1, 2, \dots$  می‌باشند.  
برای مد TM:

$$E_x = \frac{-E_{mnp}}{\gamma^2} \frac{m\pi}{a} \frac{p\pi}{d} \cos\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \sin\left(\frac{n\pi y}{b}\right) \sin\left(\frac{p\pi z}{d}\right) \quad (4-الف)$$

$$E_y = \frac{-E_{mnp}}{\gamma^2} \frac{n\pi}{b} \frac{p\pi}{d} \sin\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \cos\left(\frac{n\pi y}{b}\right) \sin\left(\frac{p\pi z}{d}\right) \quad (4-ب)$$

$$E_z = E_{mnp} \sin\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \sin\left(\frac{n\pi y}{b}\right) \cos\left(\frac{p\pi z}{d}\right) \quad (4-ج)$$

$$H_x = \frac{i\omega\epsilon}{\gamma^2} \frac{n\pi}{b} E_{mnp} \sin\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \cos\left(\frac{n\pi y}{b}\right) \cos\left(\frac{p\pi z}{d}\right) \quad (4-د)$$

$$H_y = \frac{-i\omega\epsilon}{\gamma^2} \frac{m\pi}{a} E_{mnp} \cos\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \sin\left(\frac{n\pi y}{b}\right) \cos\left(\frac{p\pi z}{d}\right) \quad (4-ه)$$

$$H_z = 0 \quad (4-و)$$

که  $m=1, 2, \dots$ ،  $n=1, 2, \dots$  و  $p=0, 1, 2, \dots$  می‌باشند.

در روابط فوق،  $\gamma^2 = \frac{m^2\pi^2}{a^2} + \frac{n^2\pi^2}{b^2}$ ،  $abd$  حجم کاواک و

$E_{mnp}$  و  $H_{mnp}$  ضرایب ثابت هستند.  $m$  و  $n$  بیانگر مرتبه مدهای تشدید شده با طول موج  $\lambda$  در کاواک مایکروفر هستند که در رابطه ویژه مقداری زیر صدق می‌کنند:

$$\frac{4}{(\lambda)^2} = \frac{m^2}{(29)^2} + \frac{n^2}{(29)^2} + \frac{p^2}{(19)^2} \quad (5)$$

با استفاده از روابط (3) و (4)، انرژی ذخیره شده در کاواک

مایکروفر را می‌توان به صورت زیر به دست آورد:

$$U_{TE} = \frac{\mu}{2} \frac{abd}{8} \left[ 1 + \frac{p^2\pi^2}{\gamma^2 d^2} \right] H_{mnp}^2 \quad (6-الف)$$

$$U_{TM} = \frac{\epsilon}{2} \frac{abd}{8} \left[ 1 + \frac{p^2\pi^2}{\gamma^2 d^2} \right] E_{mnp}^2 \quad (6-ب)$$

مرتبه مدهای تشدید یافته در کاواک مایکروفر، با توجه به فاکتور کیفیت مایکروفر مشخص می‌شود. به منظور به دست آوردن فاکتور کیفیت مایکروفر،  $Q = \frac{\omega_0 U}{P_{loss}}$ ، لازم است اتلاف انرژی در مایکروفر ارزیابی شود؛ که  $U$  انرژی ذخیره شده در کاواک،  $P_{loss}$  توان اتلاfi و  $\omega_0$  بسامد تشدید بدون اتلاف است. اتلاف انرژی در مایکروفر، ناشی از اتلاف در دی الکتریک داخل مایکروفر (هوا و محتویات آن) و دیواره‌های فلز ناکامل محفظه است. با صرف نظر از اتلاف در دی الکتریک، توان اتلاfi در کاواک مایکروفر با رابطه زیر به دست می‌آید [6]:

است. آزمایش‌هایی با چند شیء فلزی از جنس و اشکال مختلف در یک مایکروفر خانگی با توان 800 W و کاواک مکعب مستطیلی از جنس آلومینیوم به ابعاد  $29 \times 29 \times 19 \text{ cm}^3$  انجام شده است. مقایسه نتایج تئوری و تجربی، همخوانی بسیار خوبی نشان می‌دهند.

## ۲- تعیین مدهای داخل کاواک مایکروفر و پهنای باند تشدید

هر مایکروفر شامل یک مگنترون است که امواج میکروموج با بسامد 2.45 GHz و طول موج 12.24 cm را تولید می‌کند. این امواج با یک موجبر مستطیلی به داخل کاواک مایکروفر فرستاده می‌شود. درب مایکروفر شامل یک توری فلزی، از جنس آلومینیوم با فواصل حدود 1-2 mm است که نسبت به طول موج مگنترون بسیار کوچک است و در نتیجه، تمام امواج فرودی منعکس می‌شوند [4]. در اثر انعکاس امواج از سطوح فلزی کاواک، امواج ایستایی در داخل آن ایجاد می‌شود که معادلات آنها برای دو مد TE و TM با حل معادلات ماکسول در دستگاه دکارتی و با توجه به شرایط مرزی به دست می‌آیند.

با فرض صفر بودن چگالی بار و چگالی جریان در داخل کاواک مایکروفر و متناسب بودن قسمت زمانی میدان با  $e^{i\omega t}$ ، معادلات هلمهولتز برای میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی از معادلات ماکسول به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\nabla^2 \vec{E} + \omega^2 \epsilon \mu \vec{E} = 0 \quad (1)$$

$$\nabla^2 \vec{H} + \omega^2 \epsilon \mu \vec{H} = 0 \quad (2)$$

با حل معادلات فوق و جدا کردن قسمت‌های طولی و عرضی میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی، می‌توان روابط زیر را برای دو مد TE و TM به دست آورد [5]-[8]:  
برای مد TE:

$$E_x = \frac{i\omega\mu}{\gamma^2} \frac{n\pi}{b} H_{mnp} \cos\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \sin\left(\frac{n\pi y}{b}\right) \sin\left(\frac{p\pi z}{d}\right) \quad (3-الف)$$

$$E_y = \frac{-i\omega\mu}{\gamma^2} \frac{m\pi}{a} H_{mnp} \sin\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \cos\left(\frac{n\pi y}{b}\right) \sin\left(\frac{p\pi z}{d}\right) \quad (3-ب)$$

$$E_z = 0 \quad (3-ج)$$

$$H_x = \frac{H_{mnp}}{\gamma^2} \frac{m\pi}{a} \frac{p\pi}{d} \sin\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \cos\left(\frac{n\pi y}{b}\right) \cos\left(\frac{p\pi z}{d}\right) \quad (3-د)$$

$$H_y = \frac{H_{mnp}}{\gamma^2} \frac{n\pi}{b} \frac{p\pi}{d} \cos\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \sin\left(\frac{n\pi y}{b}\right) \cos\left(\frac{p\pi z}{d}\right) \quad (3-ه)$$

مشاهده می‌شود اتلاف باعث ایجاد یک باند تشدید با پهنای  $\Delta\lambda$  شده است. هر چه اتلاف بیشتر باشد، فاکتور کیفیت کمتر و در نتیجه، پهنای طول موج تشدید بیشتر خواهد شد. ذکر این نکته لازم است؛ از آنجا که در محاسبه پهنای طول موج برای دو مد TM و TE، از اتلاف دی الکتریک صرف نظر شده است؛ لذا پهنای حقیقی از مقدار به دست آمده پهن تر خواهد بود. با استفاده از رابطه ویژه مقداری (۵) و پهنای طول موج تشدید برای مدهای TM و TE، مرتبه مدهای قابل تشدید در میکروفر به دست می‌آید. نتایج به دست آمده در جدول (۱) خلاصه شده‌اند.

جدول (۱): تعدادی از مدهای قابل تشدید در اجاق میکروفر با توان 800W و ابعاد  $29 \times 29 \times 19 \text{ cm}^3$

m	n	p	طول موج (cm)
2	3	2	12.27
3	3	2	11.09
3	2	2	12.27
4	0	2	11.52
0	4	2	11.50
1	4	2	11.30
1	5	0	11.37

با توجه به روابط (۸) و دانستن مرتبه مد موج تشدید یافته در میکروفر، می‌توان ثابت‌های  $H_{mnp}$  و  $E_{mnp}$  را تعیین کرد. برای ایجاد یک موج پایا در میکروفر، باید توان میکروفر با توان اتلافی برابر باشد. با در نظر گرفتن  $P_{\text{loss}} \approx 800 \text{ W}$ ، ثابت‌های  $H_{mnp}$  و  $E_{mnp}$  برای مد  $m=3$ ،  $n=2$  و  $p=2$ ، به عنوان یک حالت خاص، به صورت زیر به دست می‌آیند:

$$H_{322} \approx 965.7 \text{ A/m} \quad (12\text{-الف})$$

$$E_{322} \approx 3.4 \times 10^5 \text{ V/m} \quad (12\text{-ب})$$

با جایگذاری مقادیر فوق در روابط (۳) و (۴) دامنه میدان الکتریکی موج تشدید یافته برابر خواهد بود با:

$$E_{0x}^{\text{TE}} = \frac{\omega\mu}{\gamma^2} \frac{n\pi}{b} H_{322} \approx 2.7 \times 10^5 \text{ V/m} \quad (13\text{-الف})$$

$$E_{0y}^{\text{TE}} = \frac{\omega\mu}{\gamma^2} \frac{m\pi}{a} H_{322} \approx 4.0 \times 10^5 \text{ V/m} \quad (13\text{-ب})$$

$$E_{0x}^{\text{TM}} = \frac{(m\pi/a)(p\pi/d)}{\gamma^2} E_{322} \approx 2.4 \times 10^5 \text{ V/m} \quad (13\text{-ج})$$

$$E_{0y}^{\text{TM}} = \frac{(n\pi/b)(p\pi/d)}{\gamma^2} E_{322} \approx 1.6 \times 10^5 \text{ V/m} \quad (13\text{-د})$$

$$E_{0z}^{\text{TM}} = E_{322} \approx 3.4 \times 10^5 \text{ V/m} \quad (13\text{-ه})$$

$$P_{\text{loss}} = \frac{1}{2\sigma\delta} \int_{\text{walls}} \vec{J}_s \cdot \vec{J}_s^* ds \quad (7)$$

که  $\vec{J}_s = \hat{n} \times \vec{H}$ ،  $\sigma$ ،  $\delta = \sqrt{2/\sigma\mu\omega}$ ، به ترتیب، جریان‌های سطحی، بردار عمود بر سطح، رسانندگی فلز و عمق نفوذ در دیواره‌های کاواک در مقابل امواج فرودی هستند. با در نظر گرفتن  $\sigma = 3.7 \times 10^7 / \Omega\text{m}$  رسانایی آلومینیوم در دیواره‌های کاواک میکروفر، عمق نفوذ در دیواره‌ها، برای امواج فرودی با بسامد 2.45 GHz، برابر  $1.6 \mu\text{m}$  به دست می‌آید. عمق نفوذ به بسامد بستگی دارد؛ بدین ترتیب، امواج با بسامد زیاد در رساناها بسیار سریع تضعیف می‌شوند و انرژی آنها به گرمای ژول تبدیل می‌شود. برای موجی که به یک رسانا می‌تابد، نفوذ به لایه نازک سطحی محدود می‌شود؛ که این پدیده اثر پوسته نامیده می‌شود. این ناتوانی میدان‌های الکتریکی نوسانی موج برای نفوذ در رسانا در مورد میدان‌های الکتریکی نوسانی؛ که به طور شبیه استاتیک به وسیله توزیع بار ایجاد می‌شوند نیز صادق است.

با جایگذاری روابط (۳) و (۴) در (۷)، توان اتلافی برای دو مد TE و TM به صورت زیر به دست می‌آید [۷]:

$$P_{\text{loss}}^{\text{TE}} = \frac{H_{mnp}^2}{4\sigma\delta} \left[ \frac{p^2\pi^2}{d\gamma^4} \left( \frac{m^2\pi^2}{a} + \frac{n^2\pi^2}{b} \right) + d(a+b) + \frac{p^2\pi^2}{d^2\gamma^2} ab \right] \quad (8\text{-الف})$$

$$P_{\text{loss}}^{\text{TM}} = \frac{\varepsilon E_{mnp}^2}{\mu} \frac{1}{4\sigma\delta} \left( \frac{p^2\pi^2}{d^2\gamma^2} + 1 \right) \left[ \frac{d}{\gamma^2} \left( \frac{m^2\pi^2}{a^2} b + \frac{n^2\pi^2}{b^2} a \right) + ab \right] \quad (8\text{-ب})$$

با توجه به روابط (۶) و (۸)، فاکتور کیفیت برای دو مد TE و TM به صورت زیر تخمین زده می‌شود [۷]:

$$Q_{\text{TE}} \approx \frac{3V}{S\delta} = 7.71 \times 10^4 \quad (9\text{-الف})$$

$$Q_{\text{TM}} \approx \frac{V}{S\delta} = 2.57 \times 10^4 \quad (9\text{-ب})$$

$\delta$  عمق نفوذ،  $V$  حجم محفظه و  $S$  سطح کل محفظه اجاق میکروفر هستند. از طرفی فاکتور کیفیت را می‌توان به صورت زیر نیز نشان داد [۶]:

$$Q = \frac{\omega_0}{\Delta\omega} = \frac{2\pi c}{\omega_0 \Delta\lambda} \quad (10)$$

با جایگذاری روابط (۹) و بسامد مگنترون در رابطه (۱۰)، پهنای طول موج تشدید برای دو مد TE و TM به صورت زیر به دست می‌آید:

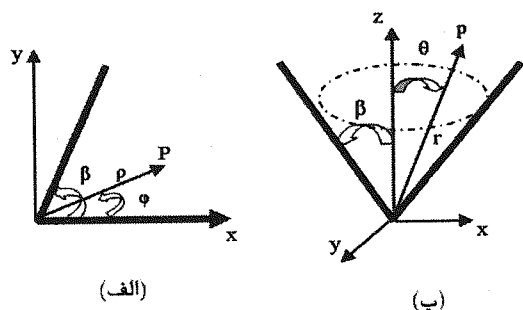
$$\Delta\lambda_{\text{TE}} \approx 1.6 \times 10^{-2} \text{ cm} \quad (11\text{-الف})$$

$$\Delta\lambda_{\text{TM}} \approx 4.8 \times 10^{-2} \text{ cm} \quad (11\text{-ب})$$

### ۳- بررسی احتمال جرقه با تقریب میدان

#### الکتروستاتیک

میلی‌متر، از نقاط تیز برای هر دو مد TM و TE احتمال جرقه وجود دارد.



شکل (۱): (الف) گوشه دو بعدی با زاویه گوشه  $\beta$ ، (ب) گوشه سه بعدی با زاویه  $\beta$

#### ۳-۲- فیزیک جرقه در اطراف قرص رسانا

قرص رسانا به شعاع  $a$  را در صفحه  $xy$  و در میدان یکنواخت  $E_0$  را در جهت  $x$  فرض می‌کنیم. با استفاده از مختصات بیضوی، پتانسیل الکتریکی را در اطراف قرص به صورت زیر به دست می‌آید [۷]:

$$\phi = \frac{-2aE_0}{\pi} \left[ \tanh(u) + \cosh(u) \tan^{-1}(\sinh(u)) \right] \cos(v) \cos(\varphi) \quad (۱۶)$$

برای ساده تر شدن بررسی نتایج، مؤلفه‌های میدان را در دستگاه مختصات استوانه‌ای به دست می‌آوریم [۹]:

$$E_\rho = \frac{2E_0}{\pi} \left[ \frac{(\cosh^2(u) + \cos^2(v)) \sinh(u)}{(\cosh^2(u) - \cos^2(v)) \cosh^2(u)} + \tan^{-1}(\sinh(u)) \right] \cos \varphi \quad (۱۷-الف)$$

$$E_\varphi = \frac{-2E_0}{\pi} \left[ \frac{\sinh(u)}{\cosh^2(u)} + \tan^{-1}(\sinh(u)) \right] \sin \varphi \quad (۱۷-ب)$$

$$E_z = \frac{2E_0}{\pi} \left[ \frac{\sin(2v) \cos \varphi}{\cosh(u)(\cosh^2(u) - \cos^2(v))} \right] \quad (۱۷-ج)$$

$u, v, \varphi$  مختصه‌های دستگاه بیضوی هستند و رابطه آنها با مختصه‌های دستگاه استوانه‌ای به صورت زیر است:

$$\rho = a \cosh(u) \cos(v), \quad z = a \sinh(u) \cos(v), \quad \varphi = \varphi$$

که  $0 \leq u < \infty$  و  $-\pi/2 \leq v \leq \pi/2$  می‌باشد.

با انجام کمی محاسبات، چگالی بار سطحی قرص رسانا به صورت زیر به دست می‌آید [۷]:

$$\sigma = \epsilon_0 E_z|_{z=0} = \frac{4\epsilon_0 E_0}{\pi} \frac{\rho}{\sqrt{a^2 - \rho^2}} \cos \varphi \quad (۱۸)$$

مشاهده می‌شود چگالی بار در زوایای  $\varphi = 0$  و  $\varphi = \pi$  و در نزدیکی لبه قرص رسانا ( $\rho = a$ ) ماکزیمم است.

با توجه به رابطه درجده، در حد بسامدهای میکروموج، رسانایی فلز به بسامد بستگی ندارد [۶]; لذا در این بررسی، از تقریب رسانا در میدان الکتروستاتیک استفاده شده است.

بررسی‌های تجربی نشان داده‌اند در اطراف نقاط تیز فلز واقع در اجاق مایکروفر احتمال جرقه بیشتر است [۷]. به منظور آشنایی با فیزیک این پدیده، میدان الکتریکی در اطراف گوشه رسانای دو و سه بعدی و نیز اطراف قرص رسانا را بررسی کرده‌ایم.

#### ۳-۱- فیزیک جرقه در نقاط تیز فلز

ابعاد نقاط تیز نسبت به طول موج داخل کاواک بسیار کوچک است؛ بنابراین می‌توان فرض کرد میدان الکتریکی در گوشه‌ها یکنواخت است.

میدان الکتریکی در اطراف گوشه دو بعدی نشان داده شده در شکل (۱-الف)، با حل معادله لاپلاس در مختصات قطبی، به صورت زیر به دست می‌آید [۶]:

$$E_\rho \approx \frac{-\pi A}{\beta} \rho^{\beta-1} \sin \frac{\pi \varphi}{\beta} \quad (۱۴-الف)$$

$$E_\varphi \approx \frac{-\pi A}{\beta} \rho^{\beta-1} \cos \frac{\pi \varphi}{\beta} \quad (۱۴-ب)$$

$\beta$  زاویه ی گوشه،  $\rho$  فاصله از گوشه و  $A$  ضریب ثابت است. شکل (۱-الف) نشان می‌دهد برای رسانای نوک تیز  $\beta > \pi$  است. در نتیجه، با توجه به معادلات (۱۲)، میدان الکتریکی در  $\rho$ -های کوچک، بسیار بزرگ؛ اما محدود خواهد بود.

با حل معادله لاپلاس در مختصات کروی میدان در اطراف گوشه سه بعدی، (شکل ۱-ب)، نیز به صورت زیر به دست می‌آید [۶]:

$$E_r \approx -v A' r^{v-1} P_v(\cos \theta) \quad (۱۵-الف)$$

$$E_\theta \approx A' r^{v-1} \sin \theta \frac{\partial}{\partial \theta} P_v(\cos \theta) \quad (۱۵-ب)$$

$P_v(\cos \theta)$  تابع لژاندر و  $A'$  ضریب ثابت است. دیده می‌شود برای رسانای نوک تیز،  $\pi - \beta \rightarrow 0$  میل می‌کند و  $v \approx [2 \ln(2 / (\pi - \beta))]^{-1}$  به صفر نزدیک می‌شود و در  $r$  های کوچک، میدان بسیار بزرگ می‌شود.

با توجه به روابط (۱۲) تا (۱۵) اگر  $A$  و  $A'$  را تقریباً برابر دامنه میدان الکتریکی موج داخل کاواک مایکروفر در نظر بگیریم، در اطراف گوشه رسانا در فاصله‌های کوچک، در حدود

بنابراین، با فرض یک قرص آلومینیومی با شعاع  $a = 5 \text{ cm}$  و در نظر گرفتن روابط (۱۳)، توان اتلافی برای مدهای TE و TM به صورت زیر به دست می‌آیند:

$$P_{TE} \approx 41.9 \text{ J/s} \quad (23\text{-الف})$$

$$P_{TM} \approx 15.3 \text{ J/s} \quad (23\text{-ب})$$

با فرض صرف نظر کردن از اتلاف گرما به صورت انتقال در محیط، تغییر دمای قرص آلومینیومی در یک ثانیه برابر خواهد بود با:

$$(\Delta\theta)_{TE} = \frac{P_{TE} \cdot 1}{mC} \approx 3997.7 \text{ }^\circ\text{C} \quad (24\text{-الف})$$

$$(\Delta\theta)_{TM} = \frac{P_{TM} \cdot 1}{mC} \approx 1429.8 \text{ }^\circ\text{C} \quad (24\text{-ب})$$

که  $m = \rho a^2 \delta = 0.0012 \text{ g}$  جرم لایه سطحی صفحه آلومینیومی با ضخامت  $\delta$  است.

جدول (۳): نقاط ذوب، جوش و گرمای تبخیر برای چند فلز نوعی

( $\rho$  چگالی حجمی،  $c_p$  گرمای ویژه در فشار ثابت،  $T_m$  نقطه ذوب و  $T_v$  نقطه جوش)

فلز	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	$c_p$ (J/g/K)	$T_m$ ( $^\circ\text{C}$ )	$T_v$ ( $^\circ\text{C}$ )
آلومینیوم	2.70	0.9	660	2450
نقره	10.5	0.23	960.80	2212
طلا	19.3	0.13	1063.00	2966
مس	8.96	0.39	1083	2590
آهن	7.87	0.46	1537	2735
قلع	7.30	0.23	232	2270

با توجه به جدول (۳) و نتایج به دست آمده در روابط (۲۴)، تغییر دمای قرص برای هر دو مد TE و TM در حدود دمای ذوب و تبخیر فلز است. وقتی یک لایه نازک فلزی در اجاق مایکروفر قرار داده می‌شود، بعد از گذشت چند ثانیه، در بعضی از نقاط صفحه فلزی دما تا نقطه ذوب و حتی تبخیر فلز بالا می‌رود و در نتیجه ذوب و یا تبخیر موضعی، شکاف‌هایی در سطح قرص ایجاد می‌شود. میدان در داخل این شکاف‌ها بسته به طول شکاف افزایش می‌یابد و هر چه شکاف باریک‌تر باشد میدان در داخل آن بزرگ‌تر می‌شود. اصولاً در لحظه ایجاد شکاف، پهنای آن در حدود میکرون است که با توجه به روابط (۱۳) میدان الکتریکی در آن ناحیه تا حد تخلیه هوا افزایش می‌یابد و در نتیجه، جرقه الکتریکی درست در مکان ایجاد شکاف اتفاق می‌افتد.

می‌توان نتیجه گرفت: اولاً، هر دو مد TE و TM در مایکروفر نقش مؤثری در ایجاد جرقه در سطوح فلزات دارند و

با استفاده از روابط (۱۷)، شدت میدان الکتریکی در چند نقطه در اطراف قرص رسانا محاسبه و نتایج در جدول (۲) خلاصه شده است. با در نظر گرفتن مقادیر به دست آمده برای شدت  $E_0$  در روابط (۱۳)، می‌توان نتیجه گرفت که برای مدهای TE و TM، در لبه‌های قرص رسانا با شعاع  $a$  در فاصله‌هایی تا حدود چند میلی‌متر از لبه قرص، شدت میدان الکتریکی می‌تواند تا حد تخلیه الکتریکی هوا،  $10^6 \text{ V/m}$ ، بالا برود.

جدول (۲): میدان الکتریکی برای چند نقطه در اطراف قرص رسانا

$\rho$	$\phi$	$z$	$E$
$a + \frac{1}{10000}a$	$0, \pi$	0	$239.64 E_0$
$\frac{a}{2}$	$\frac{\pi}{2}, \frac{3\pi}{2}$	$\frac{1}{10000}a$	$0.0006 E_0$
$a$	0	$\frac{1}{100000}a$	$319.46 E_0$

## ۴- بررسی احتمال جرقه با فرض میدان متناوب

### ۴-۱- قرص رسانا در میدان متناوب

قرص رسانا در صفحه  $xy$  به شعاع  $a$  را با تقریب به صورت صفحه رسانای مربعی با اضلاع  $a$  در نظر گرفته‌ایم. مطابق با رابطه (۱۸) بار نخیره شده در هر نیم دوره تناوب ( $\tau/2 = 2.0 \times 10^{-10} \text{ s}$ ) در دو ضلع مقابل صفحه رسانا؛ که بر زوایای  $0, \pi$  منطبق هستند، عبارت است از:

$$q = \frac{4\epsilon_0 E_0}{\pi} \int_0^{\pi} \cos(\phi) d\phi \int_0^a \frac{\rho^2}{\sqrt{a^2 - \rho^2}} d\rho = \epsilon_0 E_0 a^2 \quad (19)$$

با در نظر گرفتن رابطه فوق، جریان سطحی را می‌توان با رابطه زیر تقریب زد:

$$I = \frac{dq}{dt} \approx \frac{q}{\tau/2} = \frac{2\epsilon_0 E_0 a^2}{\tau} \quad (20)$$

با توجه به محدود شدن نفوذ موج به اندازه عمق نفوذ در رسانا، مقاومت قرص به طور تقریبی به صورت زیر بیان می‌شود:

$$R \approx \frac{a}{(a\delta)\sigma} = \frac{1}{\sigma\delta} \quad (21)$$

$\sigma$  رسانایی فلز و  $\delta$  عمق نفوذ قرص رسانا در مقابل امواج فرودی با بسامد  $\omega$  است. با توجه به روابط (۲۰) و (۲۱)، توان اتلافی اهمی به صورت زیر تخمین زده می‌شود:

$$P = I^2 R \approx \frac{1}{\sigma\delta\pi^2} \epsilon_0^2 E_0^2 a^4 \omega^2 \quad (22)$$

انتقال، تغییر دمای لایه سطحی سیم آلومینیومی در زمان یک ثانیه برابر خواهد بود با:

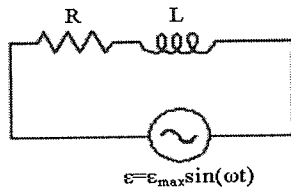
$$\Delta\theta = \frac{P \cdot t}{mC} = 2939^\circ \text{C} \quad (31)$$

که  $m = \rho(2\pi r\delta)(2\pi a) = 4.3 \times 10^{-6} \text{ kg}$  جرم لایه سطحی حلقه است.

میدان الکتریکی در شکاف‌های ایجاد شده در حلقه را می‌توان به صورت زیر تخمین زد:

$$E_G \approx \frac{\epsilon_{\max}}{d} = \frac{E_0 \pi a^2 \omega}{cd} \quad (32)$$

که  $d$ ، پهنای شکاف و  $c$ ، سرعت نور است. مطابق رابطه فوق، وقتی پهنای شکاف خیلی کوچک باشد،  $E_G$  نسبت به میدان اولیه  $E_0$  افزایش قابل ملاحظه‌ای خواهد داشت. به عنوان مثال، برای  $d = 1 \text{ mm}$  و  $E_0 = 10^4 \text{ V/m}$  میدان شکاف برابر  $E_G \approx 4 \times 10^6 \text{ V/m}$  خواهد شد که در حد شدت لازم برای تخلیه الکتریکی هوا است. بنابراین، در شکاف‌های ایجاد شده در حلقه، افزایش شدت میدان الکتریکی تا حد تخلیه الکتریکی هوا در این نقاط ایجاد جرقه می‌کند.



شکل (۲): نمودار طرح وار مدار الکتریکی پدیده جرقه در حلقه بسیار نازک فلزی

## ۵- کارهای تجربی

تعدادی آزمایش ساده با CD-ROM، ظروف شیشه‌ای با نوارهای تزیینی از جنس برنج، حلقه‌های رسانا با شکاف‌هایی در حدود ۲ میلی‌متر و قطرهای و ضخامت‌های مختلف انجام داده‌ایم [۷]. در هر آزمایش، زمان کار میکروفر را روی ۳۰ ثانیه تنظیم و مشاهدات را به طور کامل بررسی و با نتایج تئوری مقایسه کرده‌ایم. مشاهده می‌شود که نتایج تئوری و تجربی همخوانی بسیار نزدیکی دارند.

نتایج تجربی مشاهده شده در زیر خلاصه شده‌اند:

- ۱- تمام اشیای مورد آزمایش، بعد از خارج شدن از میکروفر بسیار گرم بودند؛ ولی دمای آنها یکسان نبود.
- ۲- در بعضی از اجسام؛ مانند ظروف شیشه‌ای با نوار تزیینی برنجی و CD-ROM، به همراه جرقه، نور و صدای ضعیف‌تری تولید می‌شود؛ ولی در بعضی دیگر مانند نوار قلع و

نقش TE نسبت به TM بیشتر است. ثانیاً، با صرف نظر کردن از انتقال گرما در زمان کوتاه قبل از وقوع جرقه، توان اتلافی در لایه نازک سطحی باعث افزایش دمای قابل ملاحظه‌ای در آن می‌شود.

## ۴-۲- حلقه رسانا در میدان متناوب

همان طور که از توزیع بار در قرص رسانای واقع در میدان الکتروستاتیک دریافتیم؛ بیشتر بار در لبه‌های قرص متمرکز است؛ بنابراین اگر پهنای حلقه در حدود پهنای توزیع بار در قرص رسانا باشد، می‌توان تمام توجیهای الکتروستاتیکی و جریان متناوب مربوط به احتمال جرقه در اطراف قرص رسانا را برای حلقه رسانای مورد نظر نیز تکرار کرد.

در حلقه بسیار نازک فلزی، عبور جریان متناوب ناشی از میدان متناوب الکتریکی، گرمای اتلافی قابل ملاحظه‌ای ایجاد می‌کند و دمای حلقه در بعضی نقاط تا حد ذوب و حتی تبخیر بالا می‌رود. در نتیجه، شکاف‌هایی در طول حلقه به وجود می‌آید. نمودار طرح وار مدار الکتریکی این پدیده در شکل (۲) نشان داده شده است. برای حلقه‌ای به شعاع  $a = 5 \text{ cm}$  و شعاع سطح مقطع  $r = 0.5 \text{ mm}$ ، مقدار مقاومت  $R$  و ضریب خودالقایی  $L$  به صورت زیر به دست می‌آید:

$$R = \frac{2\pi a}{\pi \sigma [(r+\delta)^2 - r^2]} \approx \frac{a}{\sigma r \delta} 1.7 \Omega \quad (25)$$

$$L = \pi \mu a / 2 = 10^{-7} \text{ H} \quad (26)$$

اگر موج الکترومغناطیسی داخل کاواک میکروفر را به صورت زیر در نظر بگیریم:

$$\vec{E} = E_0 \cos(\omega t) \vec{i} \quad (27\text{-الف})$$

$$\vec{B} = \frac{E_0}{c} \cos(\omega t) \vec{k} \quad (27\text{-ب})$$

طبق قانون لنز، برای یک حلقه به شعاع  $a$  خواهیم داشت:

$$-\frac{d\phi}{dt} = \epsilon \approx \frac{E_0}{c} \pi a^2 \omega \sin(\omega t) \quad (28)$$

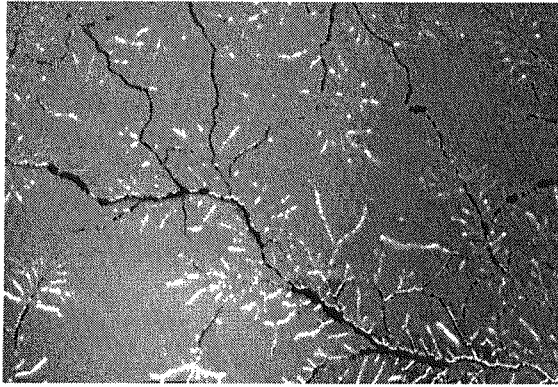
که  $\epsilon$  نیروی محرکه الکتریکی و  $\phi$  شار مغناطیسی گذرنده از حلقه است.

جریان ماکزیمم گذرنده از حلقه،  $I_{\max}$  و توان اتلافی در آن،  $P$ ، با روابط زیر تخمین زده می‌شوند:

$$I_{\max} = \frac{\epsilon_{\max}}{\sqrt{R^2 + (L\omega)^2}} \approx \frac{\epsilon_{\max}}{L\omega} = 2.6 \text{ A} \quad (29)$$

$$P = RI_{\max}^2 = 11.5 \text{ J/s} \quad (30)$$

حال با فرض صرف‌نظر کردن از اتلاف گرما به صورت



شکل (۴): تصویر میکروسکوپ نوری از شکاف‌های ایجاد شده در CD-Rewritable درون اجاق میکروفر

۸- در بعضی از آزمایش‌ها به همراه جرقه و یا بعد از وقوع آن، نور روشنی در ناحیه وقوع جرقه ایجاد می‌شود؛ که رنگ آن بسته به جنس فلز مورد آزمایش متفاوت است. این نور به علت ایجاد پلاسمای حاصل از تبخیر فلز در محل جرقه است. بخار فلز، حجمی از پلاسما در اطراف محل جرقه ایجاد می‌کند که دمای زیادی دارد. اتم‌های برانگیخته فلز تبخیر شده و وقتی به حالت پایه بر می‌گردند، تابش می‌کنند.

#### ۶- نتیجه گیری

در این مقاله، فیزیک جرقه فلزات در اجاق میکروفر به صورت تئوری و تجربی بررسی شده است. به طور کلی، عوامل مؤثر در ایجاد جرقه در فلزات داخل میکروفر جریان سطحی ایجاد شده در رسانا و افزایش میدان الکتریکی در بعضی نقاط فلز است که به ظرفیت گرمایی، شکل هندسی، نقطه ذوب و تبخیر فلز بستگی دارد. جریان سطحی ناشی از نفوذ موج ایستای داخل میکروفر در سطح فلز، گرمای اتلافی قابل ملاحظه‌ای در آن ایجاد می‌کند. این گرمای اتلافی دمای بعضی از نقاط فلز را تا حد ذوب و حتی تبخیر موضعی بالا می‌برد. در این نقاط، شکاف‌هایی ایجاد می‌شود که میدان در داخل آن‌ها بسته به دامنه موج فرودی و پهنای شکاف می‌تواند تا حد تخلیه هوا بالا برود و در نتیجه، جرقه الکتریکی اتفاق می‌افتد. اگرچه برای ساده شدن محاسبات و به دست آوردن روابط تحلیلی، فلز را به شکل قرص و حلقه فلزی فرض کرده‌ایم؛ ولی نتایج به دست آمده برای هر شکل فلز صادق است.

#### ۷- تقدیر و تشکر

نویسندگان این مقاله از جناب آقای دکتر احمد شریعتی به دلیل راهنمایی‌های علمی در انجام پایان نامه کارشناسی ارشد

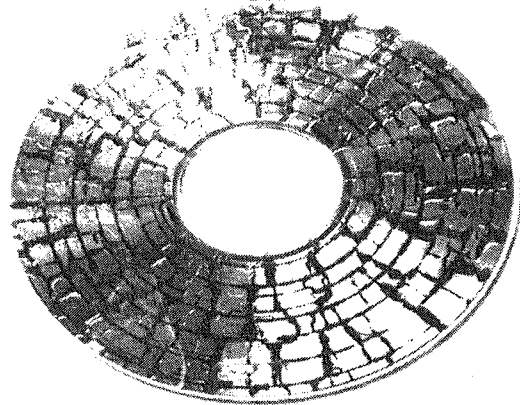
حلقه آهنی، نور شدید به همراه صدای قوی‌تری ایجاد می‌شود.  
۳- در نوار قلع با ضخامت  $0.1 \text{ mm}$  و پهنای  $2 \text{ mm}$  مشاهده شد ابتدا بعضی از نقاط نوار نازک می‌شود و سپس در لحظه قطع نوار، جرقه اتفاق می‌افتد.

۴- در تمام آزمایش‌های انجام شده، ذوب و یا تبخیر موضعی باعث ایجاد شکاف‌هایی در فلز می‌شود و در لحظه ایجاد شکاف، جرقه الکتریکی در آن نقطه اتفاق می‌افتد.

۵- شکاف‌های ایجاد شده در CD-ROM بعد از وقوع جرقه در شکل‌های (۲) و (۴) مشاهده می‌شود. شکل و پهنای شکاف‌های ایجاد شده در CD به جنس لایه فلزی آن بستگی دارد.

۶- پدیده جرقه در CD-ROM پس از گذشت زمان ۲-۵ ثانیه، در نوار تزیینی برنجی اطراف ظروف شیشه‌ای بعد از حدود ۵ ثانیه، در حلقه آهنی با قطر مقطع  $1 \text{ mm}$  و پهنای شکاف حدود  $2 \text{ mm}$  بعد از زمان ۵ ثانیه و در سیم رشته‌ای بسیار نازک مسی بعد از ۲-۳ ثانیه اتفاق می‌افتد. این اختلاف زمانی در ایجاد جرقه، به علت اتلاف توان گرمایی به صورت رسانش در داخل فلز و جنس آن است. هر چه فلز نازک‌تر و دمای ذوب یا تبخیر آن پایین‌تر باشد، وقوع جرقه سریع‌تر است.

۷- در نقاط تیز رسانا جرقه الکتریکی بعد از گذشت زمان کمتری نسبت به بقیه جاها اتفاق می‌افتد.



شکل (۳): ایجاد شکاف در CD-ROM درون اجاق میکروفر

## ۸- منابع

- [۱] "phenomena:the sparking of grapes in microwave ovens and cause thereof "WWW.geocities.com/tohyo/temple/3717/greeks/eegrpe.htm
- [۲] J. E. Chilton," Temporal and aspects of microwave excitation of compact disk", Department of physics, university of Wisconsin-Madison, Wisconsin,5370
- [۳] M. Vollmer, et. al, " Microwave oven experiments with metals and light source",  
[WWW.jop/journals/physics](http://WWW.jop/journals/physics)
- [۴] M. Vollmer, et. al, " Physics of the microwave oven", physicseducation, 2004
- [۵] John D. Kraus (Author), Keith R. Carver (Editor); Electromagnetics with applications, 5<sup>th</sup> Edition, McGraw-Hill Book Company, 1999.
- [۶] J. D. Jacson. "Classical Electrodynamics",3<sup>rd</sup> Edition, Library of congress cataloging-in-pablication data 1999
- [۷] لیلا مشهدی، بررسی فیزیک جرقه فلزات در اجاق مایکروفر، پایان نامه کارشناسی ارشد، استاد راهنما: دکتر احمد شریعتی، ۱۳۸۴
- [۸] OMP. Gandhi,"Microwave engineering and applications", Maxwell MacMillan international editions, 1989
- [۹] محمد خرمی، 'مختصات بیضوی در چند مسأله الکترومغناطیس'،  
[mamwad@mailaps.org](mailto:mamwad@mailaps.org)
- [۱۰] J. C. Gallawa, "How Does A Microwave Oven Werk?, Basic theory Of Operation", The Complete Microwave Oven Service Handbook, 2000.