

zhdf@kashanu.ac.ir :

(دریافت مقاله: ۱۳۸۹/۴/۳۰؛ دریافت نسخه نهایی: ۱۳۸۹/۱۱/۲)

$(T_m)$

$(I_m)$

ویلیکینز [۱] اولین کسانی بودند که فرآیند ترمولومینسانس را به صورت نظری مورد بررسی قرار دادند. هورنیاک و فرانکلین [۲] برای بررسی رفتار منحنی‌های تابش ترمولومینسانس، توزیع پیوسته و گاوسی را برای مراکزگیراندازی در نظر گرفتند. هورنیاک و چن [۳] رفتار قله‌های تابش ترمولومینسانس با سینتیک مرتبه اول و توزیع پیوسته و یکنواخت از حالت‌های گیراندازی را مورد بررسی قرار دادند. کیتیز و گومز-راس [۴] رابطه شدت ترمولومینسانس مرتبه اول با توزیع پیوسته از حالت‌های گیراندازی را به صورت تابعی از  $T_m$  و  $I_m$  معرفی کردند. مزیت بیان رابطه شدت ترمولومینسانس برحسب  $I_m$  و  $T_m$  به جای  $n_0$  (تمرکز اولیه حامل‌های بار در مرکزگیراندازی بر حسب  $\text{cm}^{-3}$ ) و  $s$  (فاکتور فرکانس) در این است که  $T_m$  و  $I_m$  را به راحتی می‌توان از روی شکل قله تابش

توزیع پیوسته حالت‌های گیراندازی از زمان ارائه مدل‌های اولیه توصیف کننده پدیده ترمولومینسانس مطرح بوده است. بیشتر کارهایی که در ارتباط با بررسی سینتیکی فرآیند ترمولومینسانس انجام شده است، بر مبنای فرض یک نوع مرکزگیراندازی و یک نوع مرکز بازترکیب بوده است که مدل سینتیک مرتبه اول نامیده می‌شود. اکثر پژوهش‌های انجام شده بر اساس این مدل بوده‌اند، مدلی که در آن فرض می‌شود حامل‌های بار تحریک شده گرمایی که از مراکزگیراندازی خارج می‌شوند فقط می‌توانند در مراکز بازترکیب با حفره‌ها ترکیب شوند و امکان بازگیراندازی آنها توسط مراکزگیراندازی خالی وجود ندارد. در عین حال برای توصیف حالت‌های گیراندازی با توزیع پیوسته، توابع توزیع مختلفی مورد بررسی قرار گرفته است. راندل و

آهنگ گرمادهی موقع قرائت نمونه،  $n(\text{cm}^{-3})$  تمرکز الکترون‌های گیرافتاده در مرکز گیراندازی،  $T(K)$  دما،  $E(\text{eV})$  انرژی فعال سازی و  $k(eVK^{-1})$  ثابت بولتزمن است.

با حل معادله دیفرانسیل  $-\beta \frac{dn}{dT} = s'n(n+c) \exp(-\frac{E}{kT})$  برای یافتن  $n$  و سپس قرار دادن آن در معادله  $I(T) = -\beta \frac{dn}{dT}$  شدت ترمولومینسانس برای مدل مرتبه آمیخته در حالت تک ترازی به صورت زیر به دست می‌آید:

$$I(T) = \frac{c's'\alpha \exp(-\frac{E}{kT}) \exp(\frac{cs'}{\beta} \int_{T_0}^T \exp(-\frac{E}{kT'}) dT')}{\left( \exp(\frac{cs'}{\beta} \int_{T_0}^T \exp(-\frac{E}{kT'}) dT') - \alpha \right)^2}, \quad (2)$$

که در آن  $\alpha = \frac{n_0}{n_0+c}$  و  $n_0(\text{cm}^{-3})$  تمرکز اولیه حامل‌های بار در مرکز گیراندازی است.

این رابطه توسط کیتیز و همکارانش [۴] به رابطه‌ای برحسب  $I_m$  و  $T_m$  تبدیل شد که به صورت زیر است:

$$I(T) = I_m \frac{\left( \exp(\frac{\Delta - \Delta_m}{R_m}) - \alpha \right)^2}{\exp(\frac{\Delta - \Delta_m}{R_m})} \times \frac{\exp\left(\frac{E}{kT} \left(\frac{T-T_m}{T_m}\right)\right) \exp\left[\frac{T^\gamma}{T_m^\gamma R_m} \exp\left(\frac{E}{kT} \left(\frac{T-T_m}{T_m}\right)\right) (\Delta - \Delta)\right]}{\left\{ \exp\left[\frac{T^\gamma}{T_m^\gamma R_m} \exp\left(\frac{E}{kT} \left(\frac{T-T_m}{T_m}\right)\right) (\Delta - \Delta)\right] - \alpha \right\}^2}, \quad (3)$$

که در آن  $R_m = R(T_m) = \frac{A(T_m) + \alpha}{A(T_m) - \alpha}$ ،  $\Delta_m = \frac{\gamma k T_m}{E}$ ،  $\Delta = \frac{\gamma k T}{E}$

و  $A(T_m)$  به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$A(T_m) = \exp\left(\frac{cs'}{\beta} \int_{T_0}^{T_m} \exp(-\frac{E}{kT'}) dT'\right). \quad (4)$$

چنانکه اشاره شد، مدل پیشنهادی بر اساس وجود یک مرکز بازترکیب، یک مرکز گیراندازی با توزیع پیوسته و یکنواخت و یک مرکز گیر اندازی عمیق (که در حین تخلیه گرمایی مرکز گیراندازی غیر فعال است) بنا شده است. نمایش طرح وار

ترمولومینسانس تخمین زد. زاهدی فر و همکارانش [۵] همین کار را برای مدل مرتبه عام با توزیع پیوسته و یکنواخت انرژی مرکز گیر اندازی انجام دادند و در آن پارامتر مرتبه سینتیک مؤثر را به جای پارامتر مرتبه سینتیک  $b$  در مدل مرتبه عام معرفی کردند. با توجه به اینکه در مدل تک ترازی پارامتر مرتبه سینتیک به نحوی گویای رقابت میان بازگیراندازی و بازترکیب حامل‌های باری است که به باند هدایت تحریک شده‌اند، در مورد یک توزیع پیوسته انرژی مراکز گیراندازی که در ایجاد یک قله نقش دارند، بازگیراندازی به همه سطوح انرژی در مدل به عنوان بازگیراندازی تلقی می‌شود و لذا یک مرتبه سینتیک مؤثر برای بازه انرژی تعریف می‌شود. در همه کارهایی که برای بررسی رابطه شدت ترمولومینسانس انجام شده است، یک نوع مرکز گیراندازی و یک نوع مرکز بازترکیب در نظر گرفته شده است. این در حالی است که نمونه‌های واقعی شامل انواع مختلف نواقص و ناخالصی‌ها هستند. چن و همکارانش [۶] مدل مرتبه آمیخته ترمولومینسانس را معرفی کردند که در آن یک مرکز گیراندازی عمیق نیز علاوه بر مرکز گیراندازی و مرکز بازترکیب در نظر گرفته شده است. مدل چن با وجود اینکه مدل واقعی‌تری نسبت به مدل‌های دیگر است، ولی توزیع پیوسته از مراکز گیراندازی در آن لحاظ نشده است. هدف از این کار این است که ضمن تعمیم رابطه شدت ترمولومینسانس مدل مرتبه آمیخته در حالت تک ترازی به یک حالت با توزیع پیوسته و یکنواخت از مراکز گیراندازی، رابطه نهایی شدت را به رابطه‌ای برحسب  $I_m$  و  $T_m$  نیز تبدیل کنیم.

رابطه شدت ترمولومینسانس مدل مرتبه آمیخته چن [۶] با استفاده از حل معادله زیر به دست آمده است:

$$I(T) = -\beta \frac{dn}{dT} = s'n(n+c) \exp(-\frac{E}{kT}), \quad (1)$$

که در آن  $s' = \frac{s}{N+c}$ ،  $s(s^{-1})$  فاکتور فرکانس،  $N(\text{cm}^{-3})$  چگالی مراکز گیراندازی،  $c(\text{cm}^{-3})$  چگالی الکترون‌های گیر افتاده در مرکز گیراندازی عمیق در حین پرتودهی،  $\beta(Ks^{-1})$

$$I(T) = -\beta \frac{dn}{dT} = \int_{E_1}^{E_2} \frac{c^{\nu} s' \alpha \exp(-\frac{E}{kT}) \exp(\frac{cs'}{\beta} \int_{T_0}^T \exp(-\frac{E}{kT'}) dT')}{\left( \exp(\frac{cs'}{\beta} \int_{T_0}^T \exp(-\frac{E}{kT'}) dT') - \alpha \right)^{\nu}} dE \quad (8)$$

انتگرال روی دما در رابطه (۸) را می توان به صورت زیر تقریب زد [۷]:

$$\int_{T_0}^T \exp(\frac{E}{kT'}) dT' \cong \frac{kT^{\nu}}{E} \exp(-\frac{E}{kT}) (1 - \frac{\nu kT}{E}) \quad (9)$$

با اعمال معادله (۹) در معادله (۸) و با در نظر گرفتن اینکه تغییرات  $E$  فقط در قسمت نمایی (به صورت  $\exp(-E/kT)$ ) قابل ملاحظه و در بقیه جاها قابل صرف نظر است، می توان  $E$  واقع در نما را متغیر و در سایر موارد ثابت و برابر با  $E_{eff}$  در نظر گرفت و انتگرال روی انرژی را حل کرد [۵]. در این صورت خواهیم داشت:

$$I(T) = \frac{c\beta\alpha E_{eff}}{T(1-\Delta)\Delta E} \times \left\{ \begin{aligned} & \left[ \exp\left(\frac{cs'}{\beta} \frac{kT^{\nu}}{E_{eff}} (1-\Delta) \exp(-\frac{E_{eff}}{kT} - \frac{\Delta E}{\nu kT})\right) - \alpha \right]^{-\nu} \\ & \left[ \exp\left(\frac{cs'}{\beta} \frac{kT^{\nu}}{E_{eff}} (1-\Delta) \exp(-\frac{E_{eff}}{kT} + \frac{\Delta E}{\nu kT})\right) - \alpha \right]^{-\nu} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

که در آن  $E_1 = E_{eff} - \frac{\Delta E}{\nu}$  و  $E_2 = E_{eff} + \frac{\Delta E}{\nu}$  است.

برای پیدا کردن شرط نقطه ماکزیمم به صورت زیر عمل می کنیم:

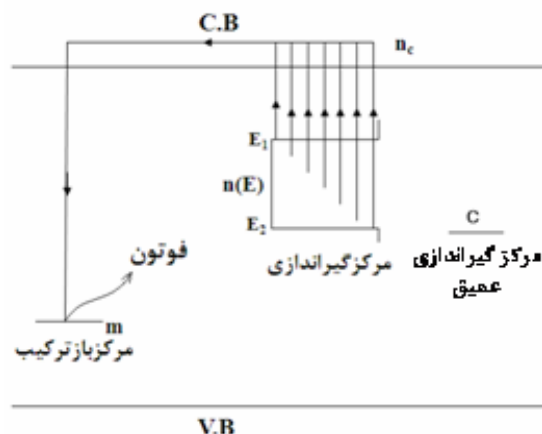
$$\left( \frac{d}{dT} I(T) \right)_{T=T_m} = 0, \quad (11)$$

برای این منظور از رابطه (۸) نسبت به  $T$  مشتق می گیریم و به ازای  $T = T_m$  مساوی صفر قرار می دهیم. برای انتگرال روی دما از رابطه (۹) و برای انتگرال روی انرژی از قضیه مقدار میانگین که به صورت زیر است استفاده می کنیم:

$$\int_{E_1}^{E_2} f(E) dE = f(E_{eff})(E_2 - E_1), \quad (12)$$

که در این صورت شرط نقطه ماکزیمم به صورت زیر می شود:

$$\frac{E_{eff}}{kT_m^{\nu}} = \frac{cs'}{\beta} \exp(-\frac{E_{eff}}{kT_m}) R_m, \quad (13)$$



شکل ۱. نمایش طرح وار سطوح انرژی در باند ممنوع در مدل پیشنهادی.

سطوح انرژی در شکل ۱ مشاهده می شود.

با حل معادله دیفرانسیل  $-\beta \frac{dn}{dT} = s'n(n+c) \exp(-\frac{E}{kT})$  در معادله (۱)، تمرکز حالت های گیراندازی ( $n$ ) به صورت تابعی از دما به صورت زیر خواهد بود:

$$n = \frac{n_0(1-\alpha)}{\exp\left(\frac{cs'}{\beta} \int_{T_0}^T \exp(-\frac{E}{kT'}) dT'\right) - \alpha} \quad (5)$$

با در نظر گرفتن توزیع پیوسته و یکنواخت از مراکز گیراندازی رابطه فوق به صورت زیر در می آید:

$$n(E)dE = \frac{n_0}{\Delta E} \frac{(1-\alpha)}{\exp\left(\frac{cs'}{\beta} \int_{T_0}^T \exp(-\frac{E}{kT'}) dT'\right) - \alpha} dE, \quad (6)$$

که در آن  $\Delta E = E_2 - E_1$  است.  $E_1$  و  $E_2$  چنانکه شکل ۱ نشان می دهد ابتدا و انتهای بازه توزیع پیوسته انرژی مراکز گیراندازی هستند و  $n(E)dE$  تمرکز الکترون های گیر افتاده در مرکز گیراندازی را در بازه  $E$  تا  $E+dE$  نشان می دهد. بدیهی است که انتگرال رابطه فوق روی کل بازه انرژی،  $n$  را به دست می دهد:

$$n = \int_{E_1}^{E_2} \frac{n_0}{\Delta E} \frac{(1-\alpha)}{\exp\left(\frac{cs'}{\beta} \int_{T_0}^T \exp(-\frac{E}{kT'}) dT'\right) - \alpha} dE. \quad (7)$$

طبق رابطه فوق و رابطه (۱) می توان شدت ترمولومینسانس در مدل مرتبه آمیخته با توزیع پیوسته و یکنواخت از مراکز گیراندازی را به صورت زیر به دست آورد:

صفر ( $R_m$  برابر با ۱) قرار داده شود، رابطه شدت ترمولومینسانس در مدل جدید به رابطه شدت ترمولومینسانس در مدل مرتبه اول با توزیع پیوسته از انرژی گیراندازی تبدیل می شود [۹]. مزیت نوشتن رابطه شدت ترمولومینسانس برحسب  $I_m$  و  $T_m$  (به جای  $n_0$  و  $s$ ) در این است که این پارامترها را به راحتی می توان از روی منحنی تابش ترمولومینسانس تجربی تخمین زد و برای انجام فرآیند برازش مورد استفاده قرار داد. اما مشکلی که وجود دارد این است که معادله (۱۶) با فرض اینکه  $R_m$  صرفاً تابعی از  $\alpha$  باشد به دست آمده است و بایستی رابطه  $R_m$  برحسب  $\alpha$  را به دست آورد. اگر فرض در نظر گرفته شده در رابطه (۴) را با در نظر گرفتن  $E = E_{eff}$  برای توزیع پیوسته از مراکزگیراندازی به کار بریم، طبق معادلات (۴)، (۹) و (۱۳) به رابطه ای به صورت زیر خواهیم رسید:

$$A(T_m) = \exp\left(\frac{A(T_m) - \alpha}{A(T_m) + \alpha}(\Delta_m)\right). \quad (17)$$

معادله (۱۷) را نمی توان به صورت تحلیلی حل کرد و به یک رابطه برای  $A_m$  برحسب  $\alpha$  رسید. کیتیز [۴] در کار خود بستگی  $A_m$  به  $\Delta_m$  را نادیده می گیرد (یعنی معادله (۱۷) را به ازای یک  $\Delta_m$  مشخص مورد بررسی قرار می دهد) و معادله فوق را به صورت عددی حل کرده و با یک چند جمله ای برحسب  $\alpha$  برازش می کند. اما می توان نشان داد که رابطه  $A_m$  برحسب  $\alpha$  به ازای مقادیر مختلف  $\Delta_m$  متفاوت است و تغییرات  $A_m$  به ازای مقادیر مختلف  $\Delta_m$  خصوصاً به ازای مقادیر کوچک  $\alpha$  را نمی توان نادیده گرفت.

در این کار به ازای مقادیر  $0.75\text{eV} \leq E_{eff} \leq 2.75\text{eV}$  و  $320\text{K} \leq T_m \leq 620\text{K}$   $1 - \Delta_m$  کمیت  $0.786$  تا  $0.978$  به دست آمده است. این محدوده به چهار بازه تقسیم شده است و با در نظر گرفتن مقدار میانگین هر بازه، ۴ مقدار مختلف برای  $1 - \Delta_m$  به دست آمده است. به ازای هر یک از مقادیر  $1 - \Delta_m$  مقادیر مختلف  $A_m$  برحسب  $\alpha$  که با توجه به رابطه (۱۷) و به روش عددی به دست آمده است، با چند جمله ای درجه ۴ که بهترین برازش را با داده ها به دست می دهد داده شده است:

$$A_m = \alpha^4 + b\alpha^3 + c\alpha^2 + d\alpha + e. \quad (18)$$

در رابطه (۴) تعریف شده است، با این تفاوت که  $E$  با  $E_{eff}$  جایگزین شده است. با فرض اینکه  $R_m$  تابعی از  $\alpha$  باشد، با استفاده از معادلات (۱۰) و (۱۳) به رابطه زیر می رسیم:

$$I(T) = \frac{c\beta\alpha E_{eff}}{T(1-\Delta)\Delta E} \times \left\{ \left[ \exp\left(\frac{T^\gamma}{T_m^\gamma R_m} (1-\Delta) \exp\left(\frac{E_{eff}}{kT_m T} (T-T_m) - \frac{\Delta E}{\gamma kT}\right)\right) - \alpha \right]^{-1} - \left[ \exp\left(\frac{T^\gamma}{T_m^\gamma R_m} (1-\Delta) \exp\left(\frac{E_{eff}}{kT_m T} (T-T_m) + \frac{\Delta E}{\gamma kT}\right)\right) - \alpha \right]^{-1} \right\} \quad (14)$$

با قرار دادن  $T = T_m$  در رابطه (۱۴) خواهیم داشت:

$$I_m = \frac{c\beta\alpha E_{eff}}{T_m(1-\Delta_m)\Delta E} \left\{ \left[ \exp\left(\frac{1-\Delta_m}{R_m} \exp\left(-\frac{\Delta E}{\gamma kT_m}\right)\right) - \alpha \right]^{-1} - \left[ \exp\left(\frac{1-\Delta_m}{R_m} \exp\left(\frac{\Delta E}{\gamma kT_m}\right)\right) - \alpha \right]^{-1} \right\} \quad (15)$$

که در آن  $\Delta_m = \frac{\gamma kT_m}{E_{eff}}$  است.

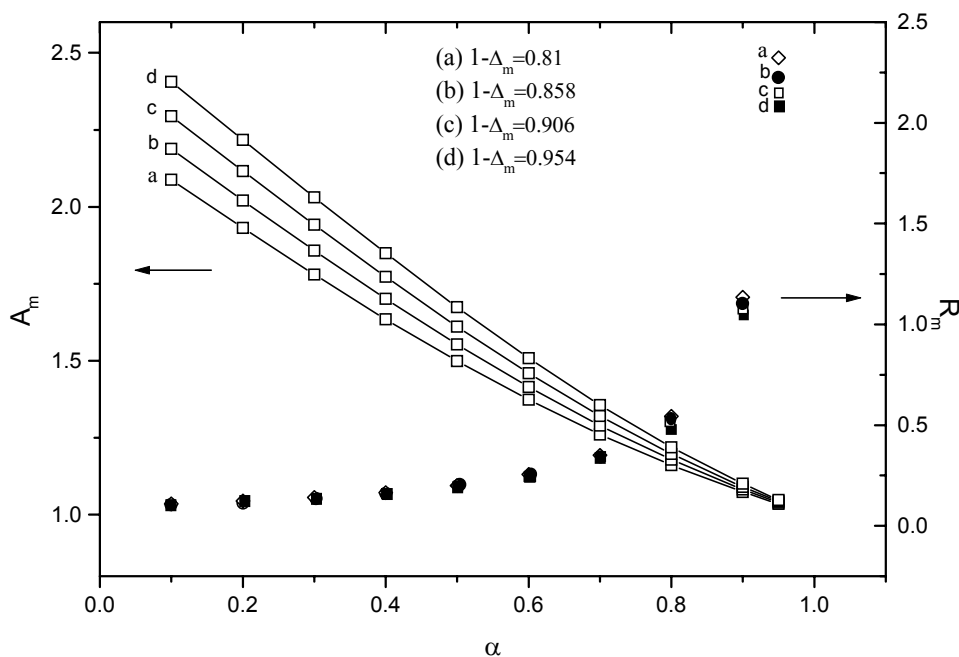
طبق معادلات (۱۴) و (۱۵) می توان رابطه نهایی شدت ترمولومینسانس بر اساس مدل مرتبه آمیخته در حالت با توزیع پیوسته و یکنواخت از مراکزگیراندازی را برحسب  $I_m$  و  $T_m$  به دست آورد:

$$I(T) = I_m \frac{T_m(1-\Delta_m)}{T(1-\Delta)} \times \left\{ \left[ \exp\left(\frac{T^\gamma}{T_m^\gamma R_m} (1-\Delta) \exp\left(\frac{E_{eff}}{kT_m T} (T-T_m) - \frac{\Delta E}{\gamma kT}\right)\right) - \alpha \right]^{-1} - \left[ \exp\left(\frac{T^\gamma}{T_m^\gamma R_m} (1-\Delta) \exp\left(\frac{E_{eff}}{kT_m T} (T-T_m) + \frac{\Delta E}{\gamma kT}\right)\right) - \alpha \right]^{-1} \right\} \times \left\{ \left[ \exp\left(\frac{1-\Delta_m}{R_m} \exp\left(-\frac{\Delta E}{\gamma kT_m}\right)\right) - \alpha \right]^{-1} - \left[ \exp\left(\frac{1-\Delta_m}{R_m} \exp\left(\frac{\Delta E}{\gamma kT_m}\right)\right) - \alpha \right]^{-1} \right\}^{-1} \quad (16)$$

به راحتی می توان نشان داد که با نزدیک شدن  $\Delta E$  به سمت صفر معادله (۱۶) به معادله (۳) تبدیل می شود. وقتی در معادله (۱۶)  $\Delta E = 0$  قرار داده می شود، در ابتدا جواب مبهم  $I(T) = 0/0$  حاصل می شود. ولی وقتی رفع ابهام شود، به راحتی می توان به رابطه (۳) رسید. همچنین وقتی  $\alpha$  برابر با

جدول ۱. مقادیر مربوط به ضرایب ثابت معادله (۱۸) با استفاده از برازش این معادله با نقاط حاصل از رابطه ۱۷ به ازای مقادیر مختلف  $1-\Delta_m$ .

$FOM$	$e$	$d$	$c$	$b$	$a$	$(1-\Delta_m)$
۰/۱۰۳	۲/۲۴۵۵	-۱/۵۸۱۵	-۰/۰۵۷۸	۰/۵۴۲۷	-۰/۱۴۸۲	۰/۸۱
۰/۱۳۱	۲/۳۵۵۷	-۱/۶۷۲۴	-۰/۱۰۹۵	۰/۵۴۰۷	-۰/۱۱۳۳	۰/۸۵۸
۰/۱۵۳	۲/۴۷۱۵	-۱/۷۶۶۶	-۰/۱۴۴۳	۰/۴۹۷۲	-۰/۰۵۶۲	۰/۹۰۶
۰/۱۶۵	۲/۵۹۳۳	-۱/۸۶۵۴	-۰/۱۵۵۸	۰/۴۰۳۷	۰/۰۲۶۲	۰/۹۵۴



شکل ۲. تغییرات  $R_m$  و  $A_m$  بر حسب  $\alpha$  به ازای مقادیر مختلف  $1-\Delta_m$ . نقاط با استفاده از رابطه (۱۷) به دست آمده‌اند و خطوط نتیجه برازش با معادله ۱۸ هستند.

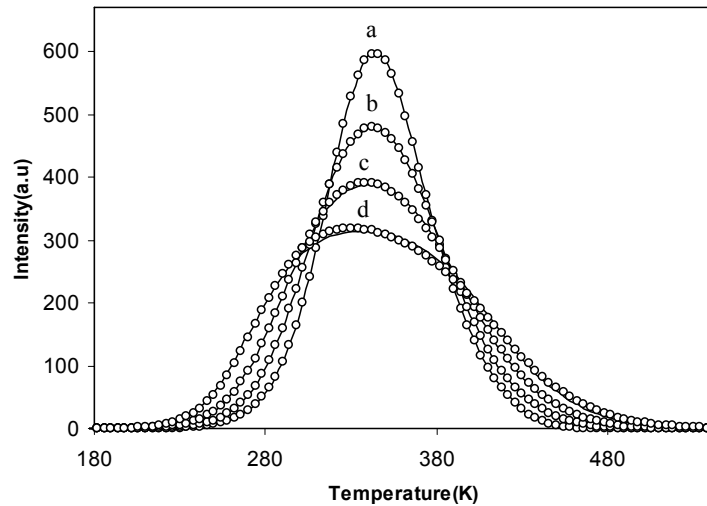
چهار مقدار مختلف برای  $1-\Delta_m$  چهار برازش جداگانه برای رابطه  $A_m$  بر حسب  $\alpha$  به دست آمده است.

همچنین نمودار رابطه  $A_m$  بر حسب  $\alpha$  به ازای مقادیر مختلف  $1-\Delta_m$  در شکل ۲ نمایش داده شده است. خطوط پیوسته در شکل ۲ منحنی‌های برازش شده طبق معادله (۱۸) و مربع‌های تو خالی مربوط به حل عددی رابطه (۱۷) برای رابطه  $A_m$  بر حسب  $\alpha$  به ازای مقادیر مختلف  $1-\Delta_m$  هستند. با نزدیک شدن پارامتر  $\alpha$  به مقدار یک، تغییرات  $A_m$  نسبت به  $\Delta_m$  قابل نظر کردن است. در حالی که با نزدیک شدن پارامتر  $\alpha$  به صفر یک پراکندگی در رابطه  $A_m$  بر حسب  $\alpha$  با تغییر  $\Delta_m$  دیده می‌شود. با توجه به رابطه  $A_m$  و  $R_m$  می‌توان

برای برازش نمودارها و به دست آوردن ضرایب در رابطه فوق از یک برنامه برازش بر اساس الگوریتم لونبرگ مارگارت<sup>۱</sup> که در آزمایشگاه ترمولومینسانس دانشگاه کاشان نوشته شده، استفاده شده است. برای به دست آوردن معیاری از یک برازش خوب از معیار  $FOM$ <sup>۲</sup> استفاده شده است [۸]. مقادیر  $FOM$  کمتر از ۲ نشان دهنده یک برازش خوب است. در جدول ۱ ضرایب  $a$ ،  $b$ ،  $c$ ،  $d$  و  $e$  به ازای چهار مقدار مختلف  $1-\Delta_m$  همراه با مقادیر  $FOM$  مربوط به آنها مشاهده می‌شود. همان طور که در شکل ۲ نشان داده شده است به ازای

۱. Levenberg-Marquart

۲. Figure of Merit



شکل ۳. قله‌های تولید شده طبق رابطه (۸) (دوایر تو خالی) و قله‌های برازش شده با استفاده از رابطه (۱۶) (خطوط ممتد).

نمودارهای  $R_m$  برحسب  $\alpha$  به ازای مقادیر مختلف  $1-\Delta_m$  را به دست آورد که در شکل ۲ و در طرف راست نمودار رسم شده است. به این ترتیب رابطه (۱۶) می‌تواند برحسب پارامترهای  $R_m$ ،  $\Delta E$ ،  $E_{eff}$ ،  $\alpha$ ،  $T_m$ ،  $I_m$  (به صورت تابعی از  $\alpha$ ) نوشته شود. این پارامترها به عنوان پارامترهای قابل تنظیم در فرآیند برازش می‌توانند مورد استفاده قرار گیرند. در شکل ۳ قله‌های تابش تئوری با استفاده از رابطه (۸)

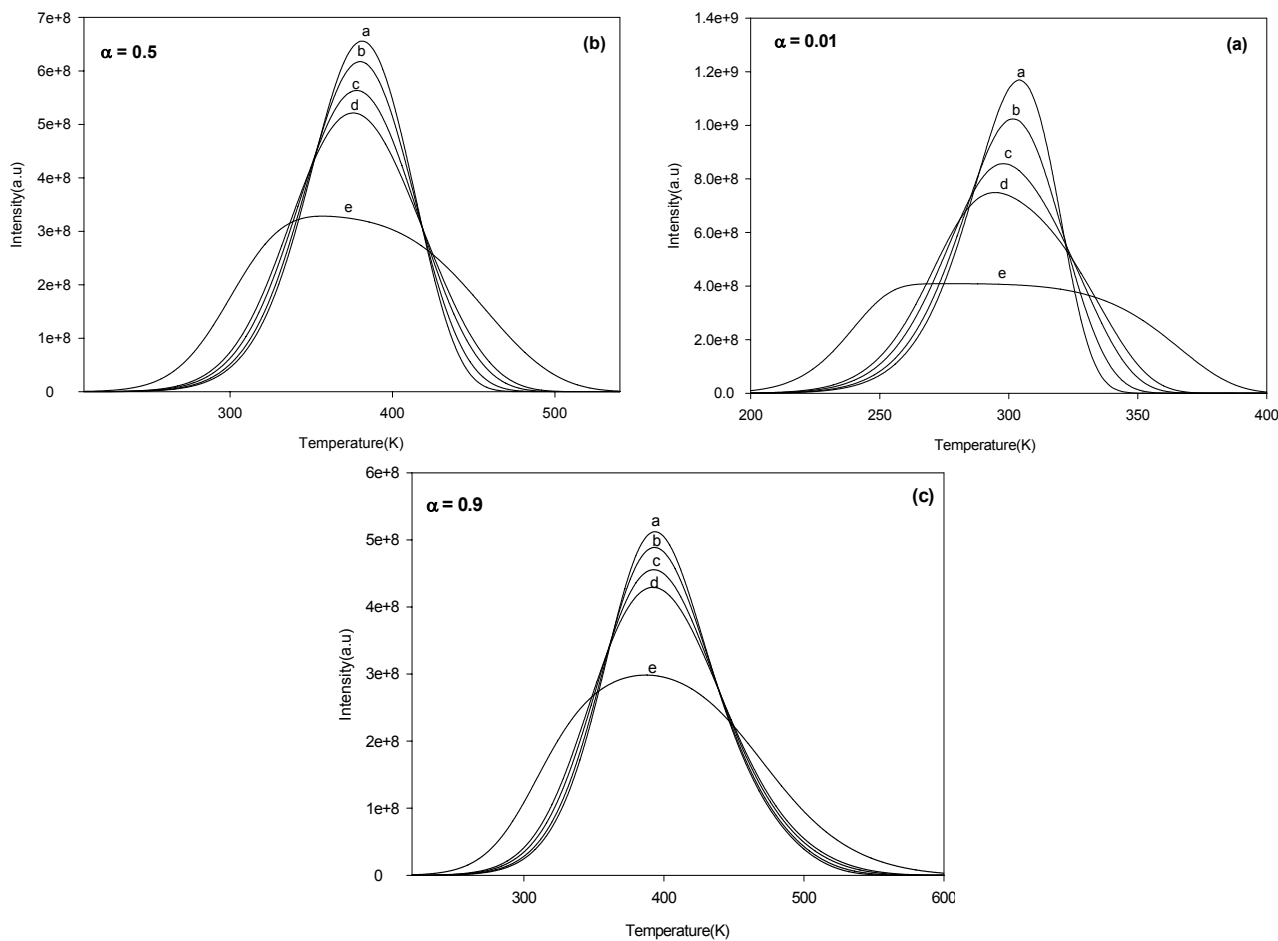
به ازای پارامترهای سینتیک  $\alpha = 0.9$ ،  $N = 10^8 \text{ (cm}^{-3}\text{)}$ ،  $E_{eff} = 0.455 \text{ eV}$ ،  $s = 10^1 \text{ (s}^{-1}\text{)}$ ،  $n_0 = 10^3 \text{ (cm}^{-3}\text{)}$  و  $\beta = 5 \text{ (Ks}^{-1}\text{)}$  به ازای مقادیر مختلف  $\Delta E$  با دوایر تو خالی نمایش داده شده است. این مقادیر ( $\Delta E$ ) عبارتند از ۰/۰۱، ۰/۱۵، ۰/۲ و ۰/۲۵ الکترون ولت، که به ترتیب با  $a$ ،  $b$ ،  $c$  و  $d$  نمایش داده شده است. همچنین خطوط ممتد مربوط به قله‌های برازش شده طبق معادله (۱۶) است. مقادیر  $FOM$  به دست آمده برای قله‌های تابش  $a$ ،  $b$ ،  $c$  و  $d$  به ترتیب برابر با ۰/۰۲، ۰/۰۴۲، ۰/۲۵ و ۰/۷۳ به دست آمده است که برازش خوبی را نشان می‌دهد.

شکل ۴ (a)، (b) و (c) با استفاده از معادله (۸) به ازای مقادیر مختلف  $\alpha$  به ترتیب برابر با ۰/۰۱، ۰/۰۵، ۰/۰۹ رسم شده‌اند. سایر پارامترهای سینتیک در شکل فوق عبارتند از:  $N = 10^{15} \text{ (cm}^{-3}\text{)}$ ،  $n_0 = 10^1 \text{ (cm}^{-3}\text{)}$ ،  $s = 10^1 \text{ (s}^{-1}\text{)}$ ،  $E_{eff} = 0.455 \text{ eV}$  و  $\beta = 5 \text{ (Ks}^{-1}\text{)}$  که به ازای مقادیر مختلف  $\Delta E$  برابر با ۰/۰۱، ۰/۰۵، ۰/۱ و ۰/۲ الکترون ولت، به همان طور که دیده می‌شود با افزایش  $\Delta E$  (مخصوصاً به ازای مقادیر کوچک  $\alpha$ ) شکل پیک تابش به سرعت تغییر می‌کند. همچنین ما یک مقایسه نیز بین مدل مرتبه ۵ام [۵] و مدل حاضر با در نظر گرفتن یک توزیع پیوسته و یکنواخت از مراکز گیراندازی انجام دادیم. به این صورت که قله‌های تابش ترمولومینسانس را با استفاده از رابطه (۱۶) با یک مقدار مشخص  $\alpha$  و مقادیر  $0.5 \text{ eV} \leq E_{eff} \leq 2.5 \text{ eV}$  و  $320 \text{ K} \leq T_m \leq 620 \text{ K}$  تولید کردیم و با رابطه متناظر در مدل مرتبه ۵ام [۵] برازش کردیم. همان طور که در شکل ۵ دیده می‌شود با تغییر پارامترها به ازای یک  $\alpha$  مشخص، پراکندگی در مقادیر  $b$  مشاهده می‌شود. پراکندگی در مقادیر  $b$  به ازای مقادیر مختلف  $\alpha$  بین ۰/۰۱ تا ۰/۹ وجود دارد. این پراکندگی موقعی کمتر شده است که ما از  $R_m$  ارائه شده در این تحقیق استفاده کردیم که دقت روابط را افزایش داده است. همچنین دیده می‌شود که با کم شدن مقدار  $\alpha$  میزان این پراکندگی کمتر می‌شود و به صفر می‌رسد. علت این است که هر دو مدل مرتبه ۵ام [۵] و مرتبه آمیخته (رابطه ۱۶) به ازای  $\alpha = 0$  به رابطه متناظرشان در مدل مرتبه اول [۴] تبدیل می‌شوند.

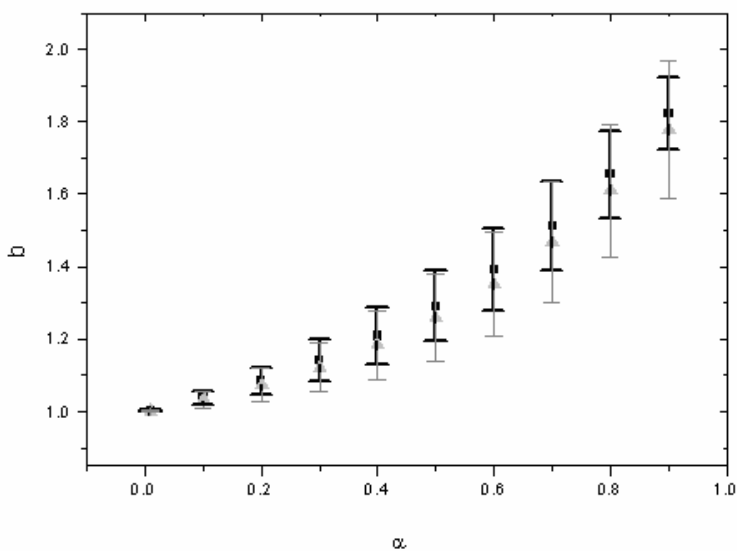
نمودارهای  $R_m$  برحسب  $\alpha$  به ازای مقادیر مختلف  $1-\Delta_m$  را به دست آورد که در شکل ۲ و در طرف راست نمودار رسم شده است. به این ترتیب رابطه (۱۶) می‌تواند برحسب پارامترهای  $R_m$ ،  $\Delta E$ ،  $E_{eff}$ ،  $\alpha$ ،  $T_m$ ،  $I_m$  (به صورت تابعی از  $\alpha$ ) نوشته شود. این پارامترها به عنوان پارامترهای قابل تنظیم در فرآیند برازش می‌توانند مورد استفاده قرار گیرند. در شکل ۳ قله‌های تابش تئوری با استفاده از رابطه (۸)

به ازای پارامترهای سینتیک  $\alpha = 0.9$ ،  $N = 10^8 \text{ (cm}^{-3}\text{)}$ ،  $E_{eff} = 0.455 \text{ eV}$ ،  $s = 10^1 \text{ (s}^{-1}\text{)}$ ،  $n_0 = 10^3 \text{ (cm}^{-3}\text{)}$  و  $\beta = 5 \text{ (Ks}^{-1}\text{)}$  به ازای مقادیر مختلف  $\Delta E$  با دوایر تو خالی نمایش داده شده است. این مقادیر ( $\Delta E$ ) عبارتند از ۰/۰۱، ۰/۱۵، ۰/۲ و ۰/۲۵ الکترون ولت، که به ترتیب با  $a$ ،  $b$ ،  $c$  و  $d$  نمایش داده شده است. همچنین خطوط ممتد مربوط به قله‌های برازش شده طبق معادله (۱۶) است. مقادیر  $FOM$  به دست آمده برای قله‌های تابش  $a$ ،  $b$ ،  $c$  و  $d$  به ترتیب برابر با ۰/۰۲، ۰/۰۴۲، ۰/۲۵ و ۰/۷۳ به دست آمده است که برازش خوبی را نشان می‌دهد.

شکل ۴ (a)، (b) و (c) با استفاده از معادله (۸) به ازای مقادیر مختلف  $\alpha$  به ترتیب برابر با ۰/۰۱، ۰/۰۵، ۰/۰۹ رسم شده‌اند. سایر پارامترهای سینتیک در شکل فوق عبارتند از:  $N = 10^{15} \text{ (cm}^{-3}\text{)}$ ،  $n_0 = 10^1 \text{ (cm}^{-3}\text{)}$ ،  $s = 10^1 \text{ (s}^{-1}\text{)}$ ،  $E_{eff} = 0.455 \text{ eV}$  و  $\beta = 5 \text{ (Ks}^{-1}\text{)}$  که به ازای مقادیر مختلف  $\Delta E$  برابر با ۰/۰۱، ۰/۰۵، ۰/۱ و ۰/۲ الکترون ولت، به همان طور که دیده می‌شود با افزایش  $\Delta E$  (مخصوصاً به ازای مقادیر کوچک  $\alpha$ ) شکل پیک تابش به سرعت تغییر می‌کند. همچنین ما یک مقایسه نیز بین مدل مرتبه ۵ام [۵] و مدل حاضر با در نظر گرفتن یک توزیع پیوسته و یکنواخت از مراکز گیراندازی انجام دادیم. به این صورت که قله‌های تابش ترمولومینسانس را با استفاده از رابطه (۱۶) با یک مقدار مشخص  $\alpha$  و مقادیر  $0.5 \text{ eV} \leq E_{eff} \leq 2.5 \text{ eV}$  و  $320 \text{ K} \leq T_m \leq 620 \text{ K}$  تولید کردیم و با رابطه متناظر در مدل مرتبه ۵ام [۵] برازش کردیم. همان طور که در شکل ۵ دیده می‌شود با تغییر پارامترها به ازای یک  $\alpha$  مشخص، پراکندگی در مقادیر  $b$  مشاهده می‌شود. پراکندگی در مقادیر  $b$  به ازای مقادیر مختلف  $\alpha$  بین ۰/۰۱ تا ۰/۹ وجود دارد. این پراکندگی موقعی کمتر شده است که ما از  $R_m$  ارائه شده در این تحقیق استفاده کردیم که دقت روابط را افزایش داده است. همچنین دیده می‌شود که با کم شدن مقدار  $\alpha$  میزان این پراکندگی کمتر می‌شود و به صفر می‌رسد. علت این است که هر دو مدل مرتبه ۵ام [۵] و مرتبه آمیخته (رابطه ۱۶) به ازای  $\alpha = 0$  به رابطه متناظرشان در مدل مرتبه اول [۴] تبدیل می‌شوند.



شکل ۴. شکل قله‌های ترمولومینسانس به ازای مقادیر مختلف  $\Delta E$  برابر با ۰/۱، ۰/۰۵، ۰/۰۸، ۰/۱ و ۰/۲ eV که به ترتیب با  $a, b, c, d$  و  $e$  نشان داده شده‌اند. شکل‌های (a) و (b) و (c) به ترتیب مربوط به  $\alpha = ۰/۰۱$ ،  $\alpha = ۰/۰۵$  و  $\alpha = ۰/۰۹$  هستند.



شکل ۵. رابطه  $\alpha$  و  $b$  با استفاده از  $R_m$  ارائه شده توسط کیتیز (نمودار کم‌رنگ) و با استفاده از  $R_m$  ارائه شده در این کار (نمودار پررنگ).

میانگین بازه مورد نظر به عنوان  $1-\Delta_m$  برای آن بازه استفاده کردیم (یعنی برای مقادیر  $1-\Delta_m$  که در یک بازه قرار دارند مقدار میانگین آن بازه را مورد استفاده قرار دادیم) و به ازای چهار مقدار مختلف برای  $1-\Delta_m$ ، چهار رابطه برای  $A_m$  برحسب  $\alpha$  به دست آوردیم. همچنین معادله (۱۸) و جدول ۱ در عین حال که برای رابطه (۱۶) می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد، برای مدل مرتبه آمیخته در حالت ترازوی که بر حسب  $I_m$  و  $T_m$  نوشته شده است [۴] نیز می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد.

۴. با توجه به شکل ۴ (a)، (b) و (c) می‌توان به وضوح دید که هر دو پارامتر  $\alpha$  و  $\Delta E$  روی شکل قله تابش اثر دارند، در حالی که در مدل مرتبه عام با توزیع پیوسته پارامترهای دخیل در شکل قله مرتبه سینتیک موثر،  $b$  و  $\Delta E$  هستند. همچنان که از تعریف  $\alpha$  در ذیل رابطه (۲) مشاهده می‌شود، این پارامتر به تمرکز اولیه الکترون‌ها در مراکز گیر اندازی فعال و تمرکز اولیه الکترون‌ها در مراکز گیر اندازی عمیق وابسته است، در حالی که پارامتر  $b$  را نمی‌توان به پارامترهای فیزیکی سیستم ارتباط داد. بنابراین مدل پیشنهادی که پارامتر  $\alpha$  را به عنوان یک پارامتر قابل تنظیم دیگر در مقایسه با مدل مرتبه عام ارائه می‌دهد، می‌تواند در تعیین کمیات فیزیکی وابسته به سیستم ( $c$  و  $n_o$ ) نیز مفیدتر باشد.

۱. مدل مرتبه آمیخته در حالت تک ترازوی بهتر از مدل مرتبه عام در حالت تک ترازوی قله‌های تابش ترمولومینسانس را توصیف می‌کند، زیرا در مدل مرتبه عام فرض بر وجود یک نوع مرکز گیراندازی و یک نوع مرکز بازترکیب است در حالی که در مدل مرتبه آمیخته فرض بر این است که یک نوع مرکز گیراندازی عمیق نیز وجود دارد که موقع پرتودهی نمونه کسری از حامل‌های بار توسط این مرکز گیراندازی می‌شوند و در این صورت ما با یک مدل برهم‌کنشی روبه‌رو خواهیم بود. بنابراین تبدیل این مدل به مدلی که بیان‌کننده یک مدل مرتبه آمیخته با توزیع پیوسته از مراکز گیراندازی است دارای اهمیت است.

۲. تبدیل پارامترهای قابل تنظیم در معادله شدت ترمولومینسانس (معادله ۱۶) از شکل  $n_o$  و  $s$  به  $I_m$  و  $T_m$  دارای این مزیت است که به راحتی می‌توان پارامترهای اخیر را از روی شکل قله تابش ترمولومینسانس تجربی تخمین زد و به عنوان داده‌های اولیه در فرآیند برازش مورد استفاده قرار داد.

۳. بر خلاف فرض در نظر گرفته شده در کار کیتیز [۴]، ما از بستگی  $A_m$  نسبت به  $\Delta_m$  در رابطه (۱۷) صرف نظر نکردیم و یک محدوده وسیع را برای پارامترهای  $E_{eff}$  و  $T_m$  در نظر گرفتیم و مقادیر بیشینه و کمینه  $1-\Delta_m$  را به دست آوردیم. سپس این محدوده را به چهار بازه تقسیم کرده و از مقدار

*Instrum. Methods A* **564** (2006) 515.

- R Chen, N Kristianpoller, Z Davidson, and R Visocekas, *Journal of luminescence*, **23** (1981) 293.
- G Kitis, J M Gomez-Ros, and J W N Tuyn, *J. Phys. D*, **31**(19), (1998) 2636.
- H G Balian, and N W Eddy, *Nucl. Instrum. Meth.*, **145** (1977) 389.
- R Chen, and S W S McKeever, Theory of Thermoluminescence and Related Phenomena, *World Scientific Publishing, Singapore* (1997) 41.

- J T Randall, and M H F Wilkins, *Proc. Roy. Soc. (London) A* **184** (1945a) 366.
- W F Hornyak, and A D Franklin, *International Journal of Radiation Application and Instrumentation*, **14** (1988) 81.
- W F Hornyak, and R Chen, *Journal of Luminescence*, **44** (1989) 73.
- G Kitis, and J M Gomez-Ros, *Nucl. Instrum. Methods A* **440** (2000) 224.
- M Zahedifar, L Karimi, M J and Kavianiinia, *Nucl.*