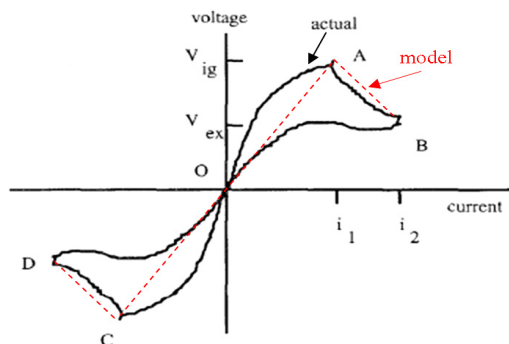


# شبیه‌سازی دینامیکی فلیکر ناشی از کوره‌های قوس الکتریکی

ساناز مسچی، مسعود علی‌اکبر گلکار و احسان هاشم‌زاده



شکل ۱: مشخصه واقعی  $v-i$  کوره.

مدل‌سازی پدیده فلیکر ناشی از کوره‌های قوس الکتریکی است که به دو روش مدار معادل در حوزه زمان و مدل‌های مبتنی بر مشخصه غیر خطی ولتاژ-جریان قوس تقسیم می‌شود.

مدار معادل حوزه زمان با توجه به عملکرد قوس و تغییرات پریودیک ولتاژ آن و مقاومتی که قوس در لحظات مختلف از خود نشان می‌دهد، قابل تقریب و استخراج است [۱].

پایه مدل‌سازی بر مبنای مشخصه غیر خطی ولتاژ-جریان کوره، بر اساس استخراج رابطه ریاضی بین جریان قوس و ولتاژ قوس از روی منحنی ولتاژ-جریان قوس می‌باشد. این نوع مدل‌سازی رایج‌ترین تکنیک در حوزه زمان برای مدل‌سازی عملکرد دینامیکی و استاتیکی کوره‌های قوس الکتریکی می‌باشد. در بخش ۲ رابطه ریاضی چهار مدل که از تقریب مشخصه واقعی  $v-i$  کوره (شکل ۱) به‌دست آمده، بیان شده است. در بخش ۳ با توسعه مدل‌های بخش ۲، مدل‌های دینامیکی متناظر به منظور شبیه‌سازی تولید فلیکر به‌دست آمده، در قسمت ۴ روش جدیدی برای مدل‌سازی فلیکر با توجه به مشخصه استاتیکی مدل‌ها ارائه شده است. بند ۵ تکنیک‌های شبیه‌سازی و نتایج آن را نشان می‌دهد. نتیجه‌گیری و بحث پیرامون مزایا و دقت هر مدل در بخش ۶ آمده است.

## ۲- مدل‌های استاتیکی حوزه زمان کوره قوس

### ۱-۲ مدل ۱: مدل تکه خطی مشخصه $v-i$

شکل ۱ یک مشخصه واقعی  $v-i$  کوره را نشان می‌دهد [۱] و [۵]. در این شکل  $v_{ig}$  ولتاژ روشن‌شدن قوس و  $v_{ex}$  ولتاژ خاموش‌شدن آن می‌باشد، که هر دوی آنها تابعی از طول قوس هستند. مدل‌سازی در حوزه زمان بر پایه مشخصه  $v-i$ ، از تقریب‌های مختلف منحنی شکل ۱ با معادلات ریاضی حاصل می‌شود.

مدل تکه خطی، ساده‌ترین تقریب خطی است که از منحنی شکل ۱ به‌دست می‌آید. در این مدل  $R_1$  و  $R_2$  به‌عنوان یک تقریب خطی، شیب خطوط OA و AB در نظر گرفته می‌شوند. شکل ۲ مشخصه ولتاژ-جریان شبیه‌سازی شده مدل ۱ را نشان می‌دهد.

در این مدل روابط بین ولتاژ و جریان کوره برای یک سیکل کاری از (۱) به‌دست می‌آید

چکیده: فلیکر ولتاژ و هارمونیک‌ها مشکلات کیفیت توان هستند که توسط کوره‌های قوس الکتریکی به سیستم قدرت تحمیل می‌شوند. برای مطالعه دقیق کوره‌ها و پیدا کردن راه حل مقابله با اثرات منفی آنها احتیاج به یک مدل مناسب از رفتار دینامیکی کوره‌ها داریم. در این مقاله ابتدا به بررسی مدل‌های مختلف کوره‌های قوس الکتریکی که به‌صورت جامع در اکثر مقالات آمده، پرداخته می‌شود. سپس با توسعه دینامیکی مدل‌ها و به‌دست آوردن مشخصه دینامیکی آنها فلیکر ناشی از مدل‌های مختلف، تحت شرایط یکسان شبیه‌سازی و با مقایسه و تحلیل نتایج، مدل مناسب و دقیق‌تر معرفی می‌شود. در انتها روش جدیدی برای مدل‌سازی فلیکر تولیدی کوره بر مبنای مدولاسیون طول قوس فعال در طی فرآیند ذوب پیشنهاد می‌گردد.

کلیدواژه: شبیه‌سازی، فلیکر، کوره قوس الکتریکی، هارمونیک.

## ۱- مقدمه

کوره‌های قوس الکتریکی که در صنایع فولادسازی به‌کار می‌روند، به‌دلیل ماهیت تصادفی قوس الکتریکی در هنگام عملیات ذوب، رفتارهای غیر خطی و متغییر با زمان از خود بروز می‌دهند و باعث بروز اغتشاش و نوسان در شکل موج ولتاژ در نقطه اتصال مشترک به شبکه می‌گردند. از آنجایی که توصیف قوس به پارامترهایی همچون ولتاژ قوس، جریان قوس و طول قوس بستگی دارد، تمام مدل‌هایی که تاکنون مطرح شده‌اند به‌نحوی سعی کرده‌اند یک ارتباط بین پارامترهای فوق برقرار کنند. در حالت کلی روش‌های مختلف مدل‌سازی کوره به دو گروه مدل‌سازی در حوزه فرکانس و مدل‌سازی در حوزه زمان تقسیم می‌شوند. در آنالیز حوزه فرکانسی در بعضی از مقالات ولتاژ و جریان قوس به‌وسیله مؤلفه‌های هارمونیک آن نشان داده می‌شود و برای هر هارمونیک مدار معادل سیستم قدرت مربوط به آن مشخص شده و کوره نیز به‌صورت منبع ولتاژ در همان فرکانس مدل می‌شود. پاسخ کل سیستم به کمک خاصیت جمع آثار از پاسخ مدل در هر مؤلفه فرکانسی به‌دست می‌آید [۱].

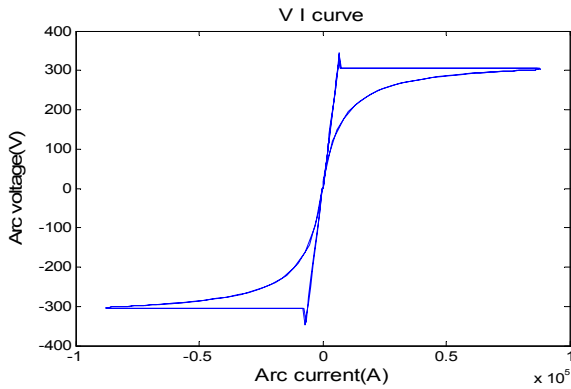
در روشی دیگر، مدل قوس از حل معادله دیفرانسیل غیر خطی کوره در حوزه فرکانس استخراج می‌شود. این معادله رابطه بین شعاع قوس و جریان قوس را بیان می‌کند [۲] تا [۴] و از آنجایی که قوس الکتریکی یک پدیده غیر خطی و متغییر با زمان است، توصیف رفتار آن در حوزه زمان به مراتب ساده‌تر از حوزه فرکانس می‌باشد.

تحلیل در حوزه زمان یکی از روش‌های اساسی در مطالعات و این مقاله در تاریخ ۱۹ مهر ماه ۱۳۸۵ دریافت و در تاریخ ۱۵ دی ماه ۱۳۸۶ بازنگری شد.

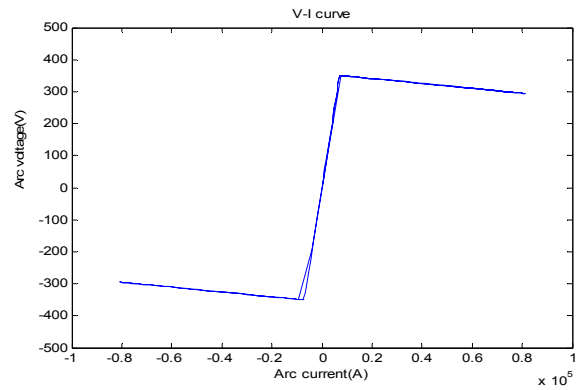
ساناز مسچی، شرکت مدیریت شبکه برق ایران، تهران  
(email: sanaz.meschi@gmail.com)

مسعود علی‌اکبر گلکار، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، تهران  
(email: golkar@kntu.ac.ir)

احسان هاشم‌زاده، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد  
(email: ehsan.hashemzadeh@gmail.com)



شکل ۴: مشخصه v-i مدل ۳.



شکل ۲: مشخصه v-i مدل تکه خطی (مدل ۱).

$$v = \begin{cases} R_1 i & (-i_r \leq i < i_1, inc) \\ & (-i_1 \leq i < i_r, dec) \\ v_{st} + (v_{ig} - v_{st}) \exp\left(\frac{i_1 - i}{i_r}\right) & i_1 \leq i < i_r, inc \\ v_{st} + (i - i_r)R_r & i \geq i_r, inc \\ v_{ex} + (i - i_r)R_r & i \geq i_r, dec \\ -v_{st} + (v_{st} - v_{ig}) \exp\left(\frac{i_1 + i}{i_r}\right) & -i_r \leq i < -i_1, dec \\ -v_{st} + (i + i_r)R_r & i < -i_r, dec \\ -v_{ex} + (i + i_r)R_r & i < -i_r, inc \end{cases} \quad (4)$$

که در آن  $R_1$ ،  $R_r$  و  $R_2$  متناظر با شیب‌های هر قسمت از مشخصه می‌باشند. همچنین داریم

$$i_1 = \frac{v_{ig}}{R_1}, \quad i_r = 1.5i_1, \quad i_2 = 3i_1, \quad i_r = \frac{v_{ex}}{R_1} \quad (5)$$

قابل ذکر است اصلاحاتی در (۴) نسبت به [۱] صورت گرفته است.

**۲-۳ مدل ۳: مدل مقاومت غیر خطی بر حسب جریان**

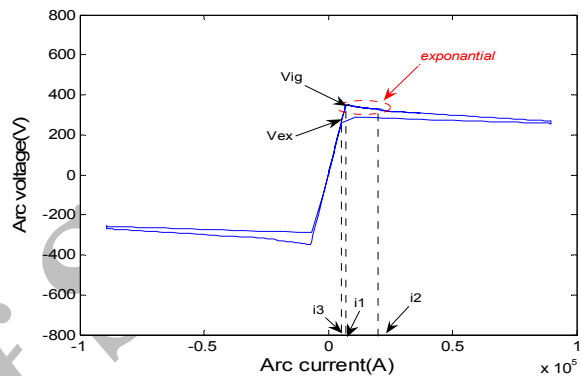
این مدل نیز مانند مدل ۲، فرآیند ذوب را در مشخصه v-i در سه بخش مدل‌سازی می‌کند. با این تفاوت که مقدار مقاومت مدل کوره را در طی فرآیند ذوب و خاموش شدن قوس، ثابت در نظر نمی‌گیرد و دو رابطه نمایی با دو ثابت زمانی متفاوت بر حسب جریان کوره برای این مراحل تعریف می‌کند [۶] و [۷]. مشخصه v-i این مدل در شکل ۴ نشان داده شده است. مقاومت قوس بر حسب جریان کوره از (۶) قابل استخراج است

$$R_a = \begin{cases} R_1, & 0 \leq I < i_{ig}, \frac{dI}{dt} > 0 \\ \frac{[v_d + (v_{ig} - v_d) \exp\left(\frac{-(I - i_{ig})}{\tau_1}\right)]}{I}, & I \geq i_{ig}, \frac{dI}{dt} > 0 \\ \frac{[v_t + (v_{ig} - v_t) \exp\left(\frac{-I}{\tau_2}\right)]}{I + i_{ig}}, & \frac{dI}{dt} < 0 \end{cases} \quad (6)$$

که در آن

$$I = |i(t)|, \quad v_{ig} = 1.5v_d, \quad (7)$$

$$i_{ig} = \frac{v_{ig}}{R_1}, \quad v_t = \left[\frac{I_{max} + i_{ig}}{I_{max}}\right]v_d$$



شکل ۳: مدل اصلاح‌شده تکه خطی (مدل ۲).

$$v = \begin{cases} R_1 i & -i_1 \leq i < i_1 \\ R_1 i + v_{ig} \left(1 - \frac{R_r}{R_1}\right) & i_1 < i \leq i_r \\ R_1 i - v_{ig} \left(1 - \frac{R_r}{R_1}\right) & -i_r \leq i < -i_1 \end{cases} \quad (1)$$

که در آن  $i_1$  و  $i_r$  به ترتیب جریان روشن‌کننده قوس و جریان خاموش‌کننده قوس می‌باشند و به صورت زیر تعریف می‌شوند

$$i_1 = \frac{v_{ig}}{R_1} \quad (2)$$

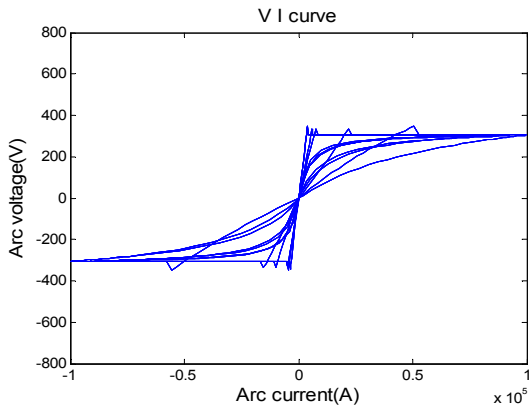
$$i_r = \frac{v_{ex}}{R_r} - v_{ig} \left(\frac{1}{R_r} - \frac{1}{R_1}\right) \quad (3)$$

**۲-۲ مدل ۲: مدل اصلاح‌شده تکه خطی**

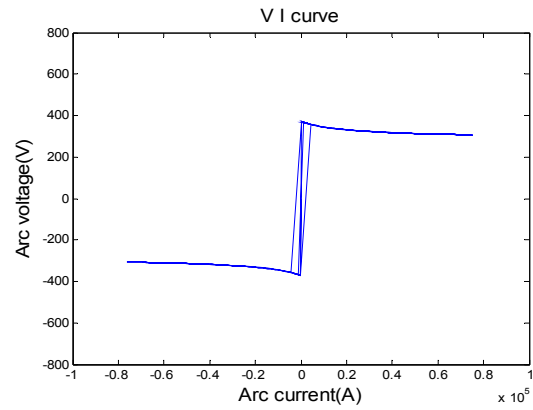
این مدل که در واقع تکمیل شده مدل ۱ می‌باشد، مشخصه v-i کوره را با دقت بیشتری تقریب می‌زند [۱] (شکل ۳).

در این مدل، در مرحله اول وقتی اندازه ولتاژ از مقدار خاموشی،  $-v_{ex}$ ، به مقدار روشن شدن،  $v_{ig}$ ، افزایش می‌یابد، قوس مثل یک مقاومت عمل می‌کند و پلاریته جریان از  $-i_r$  به  $i_1$  تغییر می‌کند.

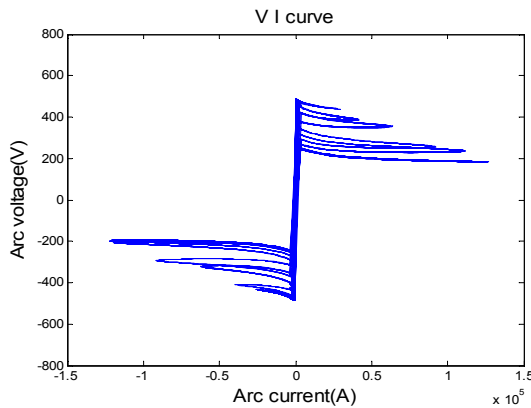
بخش دوم شروع مرحله ذوب است که منجر به افت ناگهانی ولتاژ در عرض الکترودها شده و ولتاژ از  $v_{ig}$  به مقدار  $v_{st}$  به صورت نمایی کاهش پیدا می‌کند. جریان قوس نیز به مقدار بسیار کمی از  $i_1$  به  $i_r$  افزایش می‌یابد. در سومین مرحله فرآیند ذوب، ولتاژ قوس از  $v_{st}$  به آرامی کاهش می‌یابد. بعد از تقریب هر بخش از مشخصه ولتاژ-جریان آن را می‌توان با روابط زیر بیان کرد



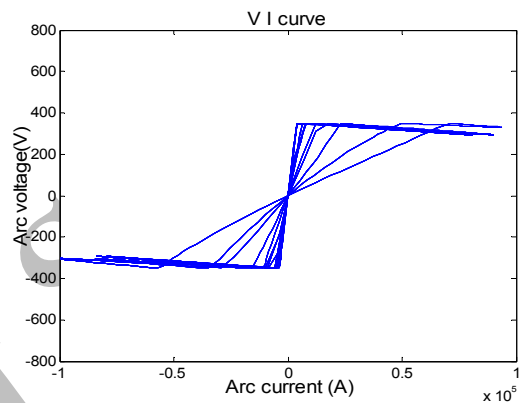
شکل ۸: مشخصه v-i دینامیکی مدل ۳.



شکل ۵: مشخصه v-i مدل ۴.



شکل ۹: مشخصه v-i دینامیکی مدل ۴.



شکل ۶: مشخصه دینامیکی v-i مدل ۱.

به صورت زیر است

$$v_{at} = A + Bl \quad (9)$$

$v_{at}$  بر حسب ولت و  $l$  طول قوس بر حسب cm می‌باشد.  $A$  و  $B$  ضرایب ثابتی هستند که از فرمول‌های تجربی به دست می‌آیند. با در نظر گرفتن طول قوس ثابت و در نتیجه  $v_{at}$  ثابت، مشخصه ولتاژ-جریان، ثابت و مستقل از زمان می‌باشد. در این حالت کوره، فلیکر ولتاژ در نقطه اتصال مشترک (PCC) تولید نمی‌کند.

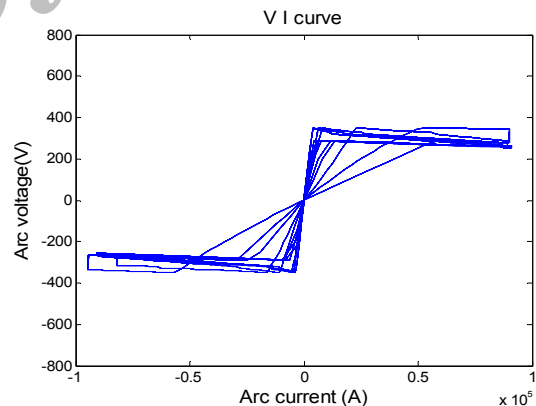
### ۳- مدل‌های دینامیکی حوزه زمان کوره قوس

از آنجا که فلیکر دارای ماهیت تصادفی و متغیر با زمان است و طبق تعریف باعث تغییرات مقدار مؤثر دامنه ولتاژ با محدوده فرکانسی مشخص (۲۵-۰/۵ Hz) می‌شود، برای آنالیز فلیکر ناشی از کوره‌های قوس، نیاز به مدل دینامیکی کوره قوس الکتریکی می‌باشد. این نیاز را می‌توان با تغییرات شیب خط مرکزی در مشخصه ولتاژ-جریان کوره حول مبدأ و در نتیجه مدل‌سازی فلیکر بر طرف نمود. در مدل ۱ و ۲ و ۳ برای مدل‌سازی تولید فلیکر طبق توضیحات فوق، به ترتیب در معادلات (۱)، (۴) و (۶)،  $R_1$  را به عنوان یک مقاومت متغیر با زمان به صورت (۱۰) تعریف می‌کنیم

$$R_1(t) = R_1(1 + m \sin(\omega_f t)) \quad (10)$$

که در آن  $\omega_f$  فرکانس فلیکر در محدوده بین (۲۵-۰/۵ Hz)،  $R_1$  مقدار مقاومت ثابت معادل کوره در سیکل خاموشی قوس و  $m$  ضریب مدولاسیون می‌باشد.

به بیان دیگر، مدل دینامیکی با تغییرات شیب خط مرکزی در مشخصه ولتاژ-جریان کوره حول مبدأ، تولید فلیکر می‌کند. لازم به ذکر است این تغییرات تنها در ربع اول و سوم امکان‌پذیر می‌باشد. چون در غیر این



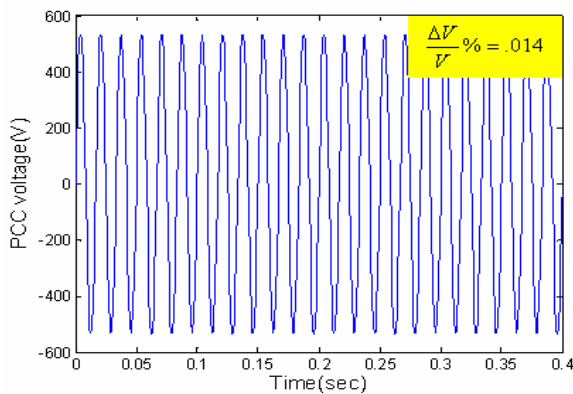
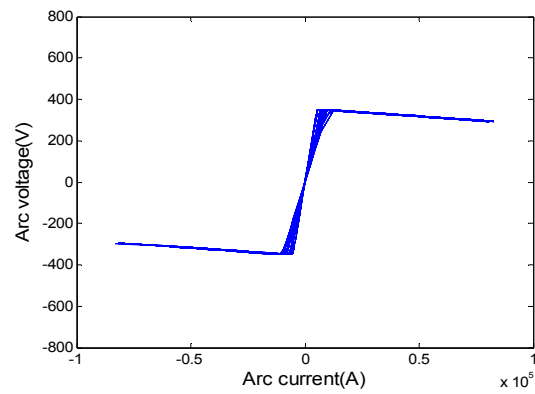
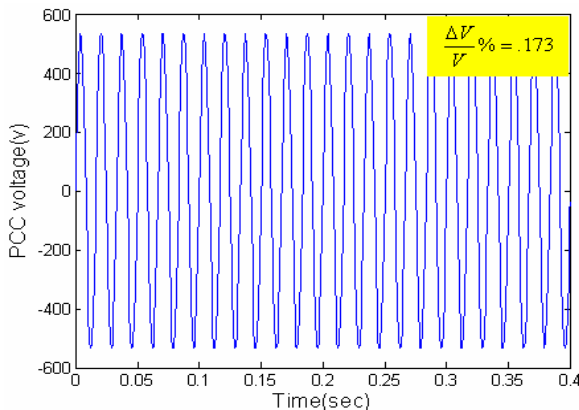
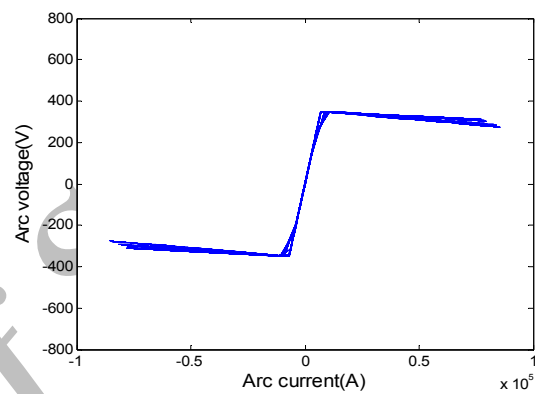
شکل ۷: مشخصه دینامیکی v-i مدل ۲.

### ۴-۲ مدل ۴: مدل هذلولی

نوع دیگر مدل ساده تقریب زده شده برای مشخصه v-i کوره، در شکل ۵ نشان داده شده است [۱] و [۸] تا [۱۲]. از آنجا که در این مدل تغییرات پلاریته ولتاژ خیلی سریع اتفاق می‌افتد، از زمان صعود ولتاژ صرف نظر شده است که نتیجه آن تغییرات ناگهانی ولتاژ در هنگام گذر از صفر جریان است. بنابراین رابطه بین ولتاژ و جریان کوره در این مدل به صورت زیر می‌باشد

$$v = \text{sign}(i) \left[ v_{at} + \frac{C}{D + |i|} \right] \quad (8)$$

که در این رابطه  $\text{sign}$  تابع علامت است. در (۸)،  $v$  و  $i$  ولتاژ و جریان کوره می‌باشند.  $C$  و  $D$  اعداد ثابت و  $v_{at}$  ولتاژی است که به طول قوس بستگی دارد و رابطه آن با طول قوس

شکل ۱۲: ولتاژ pcc مدل ۱ با ضریب مدولاسیون ۰٫۳ برای  $R_p$ .شکل ۱۰: مشخصه v-i مدل ۱ با مدولاسیون  $R_p$ .شکل ۱۳: ولتاژ pcc مدل ۱ با ضریب مدولاسیون ۰٫۳ برای  $R_p$ .شکل ۱۱: مشخصه v-i مدل ۱ با مدولاسیون  $R_p$ .

بیشتری از توان و جریان در کوره پس از روشن شدن قوس و در واقع پس از رسیدن ولتاژ کوره به ولتاژ احتراق،  $v_{ig}$ ، (متناظر با نقطه A در شکل ۱) مصرف می‌شود. همان‌طور که می‌دانیم اساسی‌ترین هدف مدل‌سازی، شبیه‌سازی عملکرد کوره و ادوات مختلف جبران‌ساز فلیکر می‌باشد. با توجه به ضعف روش‌های قبل در مدل‌سازی فلیکر، استفاده از آنها در شبیه‌سازی و تست جبران‌سازها باعث ایجاد اختلاف در نتایج شبیه‌سازی و واقعیت می‌شود.

بنابراین اگر در مدلی طول قوس فعال را تغییر دهیم نتیجه به واقعیت نزدیک‌تر می‌باشد. چون مشخصه قوس مشخصه‌ای تصادفی و متغییر با زمان است، مقاومت  $R_p$  را می‌توان با استفاده از خاصیت تصادفی قوس به صورت نویز سفید و یا سینوسی متغییر با زمان تعریف کرد.

برای تست این ایده در مدل ۱،  $R_p$  را در (۱) به صورت سینوسی متغیر با زمان در نظر می‌گیریم

$$R_p(t) = R_p(1 + m \sin(\omega_f t)) \quad (12)$$

شکل‌های ۱۰ و ۱۱ به ترتیب مشخصه v-i را برای مدل ۱ با مدولاسیون‌های  $R_p$  و  $R_p$  نشان می‌دهند. شکل موج ولتاژ نقطه اتصال مشترک برای دو روش فوق با شرایط یکسان در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ ارائه شده است. با توجه به نتایج درمی‌یابیم برای شرایط یکسان مدولاسیون مقاومت  $R_p$  فلیکر بیشتری نسبت به مدولاسیون مقاومت  $R_p$  تولید می‌کند. امکان پیاده‌سازی این روش برای سایر مدل‌ها نیز با تغییر شیب مقاومت و ثابت زمانی قوس فعال وجود دارد.

## ۵- شبیه‌سازی

در این مقاله برای شبیه‌سازی مدل‌های مختلف زمانی کوره قوس الکتریکی مبتنی بر مشخصه v-i کوره، از یک سیستم سه‌فاز استفاده شده

صورت کوره قوس الکتریکی می‌بایست همانند یک منبع قدرت توانایی تزریق توان اکتیو به شبکه را داشته باشد که عملاً این قضیه امکان‌پذیر نیست. با مقداری ضریب مدولاسیون  $m$  می‌توان این محدودیت را کنترل کرد. مشخصه ولتاژ - جریان دینامیکی مدل‌های ۱ الی ۳ که از روش فوق به دست آمده‌اند در شکل‌های ۶ تا ۸ نمایش داده شده‌اند.

لازم به توضیح است برای مدل‌سازی تولید فلیکر، مقاومت  $R_p$  را با در نظر گرفتن خاصیت تصادفی قوس می‌توان به صورت یک نویز سفید با پهنای باند ۱۴-۴ هرتز نیز تعریف کرد.

برای شبیه‌سازی فلیکر با استفاده از مدل ۴، از تغییرات سینوسی طول قوس در (۹) و در نتیجه ولتاژ  $v_{at}$  سینوسی طبق رابطه زیر در (۸) استفاده می‌کنیم

$$v_{at}(t) = v_{at}(1 + m \sin(\omega_f t)) \quad (11)$$

مشخصه ولتاژ-جریان دینامیکی مدل ۴ در شکل ۹ آمده است.

## ۴- روش پیشنهادی برای مدل‌سازی تولید فلیکر توسط کوره قوس

در مدل‌های حوزه زمان موجود، الگوی تولید فلیکر با استفاده از مدولاسیون مقاومت  $R_p$  صورت گرفته است (روش بند ۳).

با توجه به اینکه این مقاومت، مقاومت خاموشی قوس است و عمده جریان کوره در شاخه‌های کناری مشخصه ولتاژ-جریان کوره مصرف می‌شود، علی‌رغم استفاده از ضریب مدولاسیون بالا میزان فلیکر تولیدی توسط این روش ضعیف‌تر و کمتر از میزان واقعی آن است.

به نظر می‌رسد تغییر مقاومت قوس فعال که متناظر با تغییر شیب بخش‌های کناری منحنی v-i است، فلیکر بیشتری تولید خواهد نمود که این تغییرات در روش بند ۳ در نظر گرفته نشده است. در حالی که درصد

جدول ۱: پارامترهای مدل‌های شبیه‌سازی شده.

پارامترها	مدل
$V = 566 \text{ V}, f = 60 \text{ Hz}$	سیستم
$Z_s = 0.528 + j0.468 \text{ m}\Omega$	
$Z_t = 0.3366 + j3.22 \text{ m}\Omega$	
$v_{ig} = 350.75 \text{ V}, R_1 = 0.5 \Omega$	
$i_1 = 7.15 \text{ A}, v_{ex} = 289.75 \text{ V}$	مدل ۱
$R_r = -0.76 \text{ m}\Omega, i_r = 87.278 \text{ kA}$	مدل ۲
$v_{ig} = 350.75 \text{ V}, v_{ex} = 289.75 \text{ V}$	
$v_{st} = 32.75 \text{ V}, R_1 = 0.5 \Omega$	
$R_r = -0.76 \text{ m}\Omega, R_r = -0.39 \text{ m}\Omega$	
$v_{ig} = 350.75 \text{ V}, I_{max} = 100 \text{ kA}$	مدل ۳
$\tau_1 = 0.1 \text{ sec}, \tau_r = 0.2 \text{ sec}$	
$v_{at} = 289.75 \text{ V}, C = 1.68 \text{ MW}$	مدل ۴
$D = 2.065 \text{ kA}$	

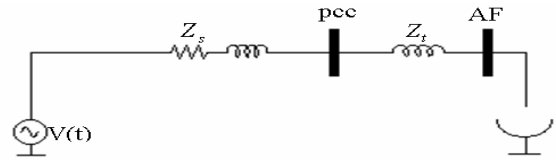
جدول ۲: مولفه‌های هارمونیک مدل‌های مختلف.

هارمونیک (%)	مدل ۱	مدل ۲	مدل ۳	مدل ۴
مولفه اصلی	۷۲,۲۲۶	۸۱,۸۲۴	۸۰,۷۲۷	۶۵,۵۶
سوم	۰,۱۸۴۶	۰,۱۵۰۶۸	۰,۱۳۶۴۴	۰,۲۰۶۳۶
پنجم	۰,۰۶۰۸۱	۰,۰۵۰۹۵	۰,۰۴۳۵۵۶	۰,۰۷۱۳۵
هفتم	۰,۰۲۵۷۷	۰,۰۲۱۲۵	۰,۰۱۷۴۲۹	۰,۰۳۱۹۷۰۷
نهم	۰,۰۱۲۲۱	۰,۰۱۲۳۲۴	۰,۰۰۹۱۲۶	۰,۰۱۶۲۰۸
یازدهم	۰,۰۰۷۱۶	۰,۰۰۹۷۸	۰,۰۰۷۲۰	۰,۰۰۹۵۰
مولفه اصلی	۳۹۸,۱۱	۳۶۲,۷	۳۹۱,۳۴۳	۴۰۷,۱۳۶
سوم	۰,۳۵۷	۰,۳۵۸۴	۰,۳۰۱۳۲	۰,۳۶۴۱۷
پنجم	۰,۱۹۵۴	۰,۲۱۰۵۳	۰,۱۵۸۶۸	۰,۲۱۳۶۵
هفتم	۰,۱۲۴۷	۰,۱۴۱۲	۰,۱۰۹۵۱	۰,۱۴۷۱۲
نهم	۰,۰۸۶۲۵	۰,۱۰۱۹۱	۰,۰۶۰۵۱۹	۰,۱۱۲۹۸
یازدهم	۰,۰۶۲۵۹	۰,۰۷۸۸۵	۰,۰۳۸۳۲	۰,۰۹۳۴۸
مولفه اصلی	۵۳۹,۵	۵۳۴,۷۳۸	۵۳۶,۳۸۷	۵۴۲,۹
سوم	۰,۳۳۴۹	۰,۳۰۹۴۹	۰,۲۸۰۵	۰,۳۴۵۳۶
پنجم	۰,۱۸۵۳	۰,۱۸۳۱۷	۰,۱۵۵۵۳	۰,۲۰۴۲۳۶
هفتم	۰,۱۱۸۲	۰,۱۲۲۰۲	۰,۱۰۱۱۱	۰,۱۴۱۲۷
نهم	۰,۰۸۱۱	۰,۰۸۶۸۸	۰,۰۷۱۳۱	۰,۱۰۸۳
یازدهم	۰,۰۵۸۱	۰,۰۶۷۰۹	۰,۰۵۲۵۳	۰,۰۸۹۰۲

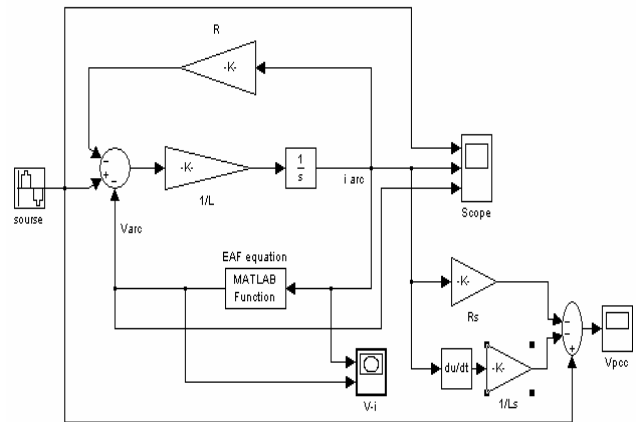
جدول ۳: مقدار  $\Delta V/V\%$  در ۱۰ هرتز برای تغییرات سینوسی قوس.

شماره مدل	$\Delta V/V\%$
مدل ۱	۰,۲۲۰۷
مدل ۲	۰,۵۹۵۶
مدل ۳	۰,۰۰۸۸۷
مدل ۴	۳,۰۴۷

مدل‌های ۱ و ۴ قادر به شبیه‌سازی بخش سوم مشخصه واقعی ذوب کوره نمی‌باشند. این تقریب پاسخ این دو مدل را از عملکرد کوره واقعی دورتر می‌کند. با توجه به نتایج فوق رفتار مدل‌های ۲ و ۳ به عملکرد واقعی کوره



شکل ۱۴: مدار تکفاز سیستم کوره.



شکل ۱۵: مدار سیستم کوره شبیه‌سازی شده در MATLAB.

است. مدار معادل تک‌فاز این سیستم مطابق شکل ۱۴ است [۱].

در شبیه‌سازی‌های انجام‌گرفته با نرم‌افزار MATLAB/SIMULINK مقادیر پارامترهای سیستم نشان داده شده در شکل ۱۴ و پارامترهای لازم برای هر مدل در جدول ۱ آمده است. دیگرام شبیه‌سازی شده مدار کوره در MATLAB در شکل ۱۵ نمایش داده شده است. ارزیابی فلیکر مستلزم در اختیار داشتن دو پارامتر عمده است. پارامتر اول درصد نوسان ولتاژ یا درصد فلیکر ولتاژ ( $\Delta V/V\%$ ) و پارامتر دوم فرکانس یا فرکانس‌های وقوع نوسانات ولتاژ می‌باشد [۱۳] و [۱۴]. برای مدل‌های ارائه‌شده مولفه‌های هارمونیک و  $\Delta V/V\%$  در فرکانس ۱۰ هرتز به ترتیب در جدول‌های ۲ و ۳ ارائه گردیده است. با در اختیار داشتن این دو پارامتر می‌توان به منحنی‌های مشخصه حساسیت فلیکر مراجعه کرد و درباره میزان قابل احساس بودن یا آزاردهنده بودن فلیکر ایجادشده قضاوت کرد.

## ۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله با بررسی مدل‌های مختلف موجود کوره‌های قوس الکتریکی، برای شبیه‌سازی فلیکر استفاده از مدل‌های زمانی مبتنی بر مشخصه ولتاژ-جریان پیشنهاد شده است. در تمامی مدل‌های فوق روابط سیکل کامل کوره قوس با فرض متقارن بودن مشخصه  $i-v$  نسبت به مبدأ مختصات استخراج شده است. در نتیجه این تقریب، تمامی مدل‌های ارائه‌شده فقط هارمونیک‌های فرد تولید می‌کنند در حالی که کوره واقعی مقداری هم هارمونیک زوج تولید می‌کند. در مشخصه واقعی ولتاژ-جریان کوره (شکل ۱) فرآیند ذوب سه بخش دارد. در بخش اول مشخصه کوره، قوس الکتریکی از حالت خاموشی به آستانه روشن‌شدن می‌رسد. در واقع تا زمانی که ولتاژ قوس به  $v_{ig}$  (ماکزیمم مقدار) برسد کوره مانند مدار باز عمل می‌کند. در بخش دوم قوس برقرار است و ولتاژ، از ولتاژ احتراق ( $v_{ig}$ ) به ولتاژ خاموشی ( $v_{ex}$ ) در اثر افزایش هدایت الکتریکی قوس افت می‌کند - متناظر با مسیر AB-. در بخش سوم قوس خاموش می‌شود و در طی آن باز هم ولتاژ کاهش پیدا می‌کند - متناظر با مسیر BO-.

- [10] G. C. Maontanari, M. Loggini, A. Carallini, L. Pitti, and D. Zaninelli, "Arc-furnace model for the study of flicker compensation in electrical networks," *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 9, no. 4, pp. 2026-2036, Oct. 1994.
- [11] L. Tang, Sh. Kolluri, and M. F. McGranaghan, "Voltage flicker prediction for two simultaneously operated ac arc furnaces," *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 12, no. 2, pp. 255-262, Apr. 1997.
- [12] B. Blazic and I. Papic, "Analysis of flicker mitigation in a utility distribution network," in *Proc. IEEE Region 8 EUROCON 2003*, vol. 2, pp. 292-296, 2003.
- [13] S. R. Mendis, M. T. Bishop, and J. F. Witte, "Investigation of voltage flicker in electric arc furnace power system," *IEEE Industry Application Mag.*, vol. 2, no. 1, pp. 28-34, Jan./Feb. 1996.
- [۱۴] د. جلالی و ا.ح. حاجی میرآقا، "ارزیابی فلیکر ناشی از کارخانه فولاد آلیاژی ایران واقع در استان یزد قسمت اول: مفاهیم اولیه و استانداردها،" *برق*، شماره ۲۶، صص. ۱۶-۱.

ساناز مسچی در سال ۱۳۶۰ در زنجان به دنیا آمد. تحصیلات خود را در مقطع کارشناسی در گرایش برق - کنترل در سال ۱۳۸۲ در دانشگاه صنعتی سهند تبریز به پایان رساند. و مدرک کارشناسی ارشد خود را در رشته برق - قدرت در سال ۱۳۸۵ از دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی دریافت نمود. نامبرده از سال ۱۳۸۵ تا کنون با شرکت مدیریت شبکه برق ایران (دیسپاچینگ ملی) و در زمینه مطالعات شبکه برق ایران همکاری دارد.

مسعود علی اکبر گلکار در سال ۱۳۳۳ در تهران بدنیا آمد. تحصیلات خود را در مقاطع کارشناسی، کارشناسی ارشد و دکتری در رشته برق-قدرت در دانشگاه‌های صنعتی شریف تهران، ایالتی اوکلاهما آمریکا و دانشگاه لندن در انگلستان در سالهای ۱۳۵۸، ۱۳۵۶ و ۱۳۶۵ به پایان رساند. فعالیتهای ایشان علاوه بر تدریس و تحقیق در دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی از سال ۱۳۵۸ تاکنون، سرپرستی پروژه‌های مختلف در مرکز تحقیقات نیرو در سالهای ۱۳۶۵ الی ۱۳۷۵ و هدایت پروژه‌های مختلف در شرکت توانیر و شرکت‌های برق منطقه‌ای تهران، شیراز و بندرعباس و بعضی دیگر شرکت‌های دیگر می‌باشد. زمینه‌های تحقیقاتی ایشان طراحی و بهره‌برداری از شبکه‌های توزیع انرژی، کنترل توان راکتیو در شبکه، منابع تولید پراکنده و انرژی‌های نو است. نامبرده از سال ۱۳۸۰ بمدت نزدیک چهار سال با دانشگاه کترین استرالیا در شعبه کشور مالزی همکاری داشته است.

دکتر گلکار چندین کتاب تالیف و ترجمه نموده و دارای سی مقاله در نشریات معتبر خارجی و داخلی و بیش از یکصد مقاله در کنفرانس‌های بین‌المللی است. نامبرده هم اکنون استاد دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی هستند.

احسان هاشم‌زاده در سال ۱۳۶۰ در تهران به دنیا آمد. تحصیلات خود را در مقطع کارشناسی و کارشناسی ارشد در رشته برق-کنترل در دانشگاه‌های صنعتی سهند تبریز، فردوسی مشهد بترتیب در سالهای ۱۳۸۳ و ۱۳۸۷ به پایان رساند.

نزدیک‌تر است. بنابراین مدل‌های ۲ و ۳ مدل‌های مناسبی برای کوره هستند.

با توجه به درصد نوسان ولتاژ ( $\Delta V/V\%$ ) و منحنی‌های مشخص‌کننده حدود رویت‌پذیری و آزار فلیکر درمی‌یابیم فلیکر تولیدی مدل ۳ قابل رویت نیست. در حالی که فلیکر تولیدی مدل ۲ رویت‌پذیر است و در آستانه آزاردهی قرار دارد. بنابراین پیشنهاد می‌شود برای آزمایش استراتژی‌های مختلف جبران‌سازی، از مدل ۲ استفاده شود.

روش پیشنهادی این مقاله برای مدل‌سازی فلیکر ناشی از کوره قوس، تغییر دادن طول قوس فعال است. این ایده برای مدل ۱ با تغییر مقاومت قوس فعال  $R_p$  پیاده‌سازی شده است. از مقایسه شکل موج ولتاژ نقطه اتصال مشترک برای مدل کوره با تغییرات  $R_1$  و  $R_2$  (شکل‌های ۱۲ و ۱۳) درمی‌یابیم که تغییر طول قوس و به تبع آن تغییرات مقاومت قوس روشن، که بیشترین مقدار توان و جریان کوره را مصرف می‌کند، در واقع منبع اصلی تولید فلیکر است که در مطالعه رفتار دینامیکی کوره می‌تواند خطای کمتری ایجاد کند.

## مراجع

- [1] T. Zheng, E. B. Makram, and A. A. Girgis, "Effect of different arc furnace models on voltage distortion," in *Proc. 8th Int. Conf. on Harmonics and Quality of Power*, vol. 2, pp. 1079-1085, 14-18 Oct. 1998.
- [2] W. Ting, S. Wemman, and Z. Yao, "A new frequency domain method for the harmonic analysis of power system with arc furnace," in *Proc. of the 4th Int. Conf. on Advances in Power System Control*, vol. 2, pp. 552-555, 11-14 Nov. 1997.
- [3] O. Ozgun and A. Abur, "Development of an arc furnace model for power quality studies," in *Proc. IEEE Power Engineering Society Summer Meeting*, vol. 1, pp. 507-511, 18-22 Jul. 1999.
- [4] O. Ozgun and A. Abur, "Flicker study using a novel arc furnace model," *IEEE Trans on Power Delivery*, vol. 17, no. 4, pp. 1158-1163, Oct. 2002.
- [5] S. Varadan, E. B. Makram, and A. A. Girgis, "A new time domain voltage source model for an arc furnace using EMTP," *IEEE Trans. on Power Del.*, vol. 11, no. 3, pp. 1685-1691, Jul. 1996.
- [6] C. Sharmeela, G. Uma, M. R. Mohan, and K. Karthikeyan, "Voltage flicker analysis and mitigation case study in ac electric arc furnace using PSCAD/EMTDC," in *Proc. Int. Conf. on Power System Technology*, vol. 1, pp. 707-712, 21-24 Nov. 2004.
- [7] T. Zheng and E. B. Makram, "An adaptive arc furnace model," *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 15, no. 3, pp. 931-939, Jul. 2000.
- [8] G. C. Maontanari, M. Loggini, L. Pitti, E. Tironi, and D. Aninelli, "The effects of series inductors for flicker reduction in electric power system supplying arc furnaces," in *Proc. IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, vol. 2, pp. 1496-1503, 2-8 Oct. 1993.
- [9] G. C. Maontanari, M. Loggini, A. Carallini, and L. Pitti, "Flicker and distortion compensation in electrical plants supplying arc furnace," in *Proc. IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, vol. 3, pp. 2249-2255, 2-6 Oct. 1994.