

مطالعه ترابرد حفره ها در نیم رساناهای آلی با روش زمان پرواز الکترونیکی

على محمودلو ا

* گروه آموزش فیزیک ، دانشگاه فرهنگیان، صندوق پستی ۸۸۹- ۱۴۶۶۵ تهران ، ایران

اطلاعات مقاله	چکیدہ
تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۹/۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۹/۲۴ تاریخ چاپ: ۱۴۰۳/۹/۲۸	در این مقاله، ما روش زمان پرواز یک بسته بار را مورد استفاده قرار داده ایم، که توسط یک پالس ولتاژ سرعت سوق وتحرک پذیری حفره ها را در نیم رساناهای آلی محاسبه کرده ایم. این تکنیک شامل اعمال یک ولتاژ به آند و محاسبه تاخیر زمانی تزریق حاملین بار به الکترود دیگر می باشد. این روش روش ساده ای برای بررسی خواص ترابرد بار در نیم رساناهای آلی می باشد.
شاپای چاپی: 2588-493x شاپای الکترونیکی: -2588 4921	ما در این قسمت تحت تاثیر ولتاژهای مختلف در دمای اتاق با استفاده از روش زمان پرواز تحرک پذیری حفره ها را با اعمال مدل شعر-مونترال در نیم رساناهای آلی محاسبه کرده ایم، هچنین تاثیر میدان الکتریکی بر روی تحرک پذیری در دو ولتاژ ۱۰۰ ولت و ۵۰ ولت برای
* نویسنده مسئول <u>a.mahmoodlou@cfu.ac.ir</u>	آرایش زمان پرواز بررسی شد و مشاهده گردید که تحرک پذیری حفره در ۱۰۰ ولت نسبت به سایر ولتاژها را دارد. تحرک پذیری حفره، که در ولتاژهای مختلف در دمای اتاق بررسی شد بهترین و مناسب ترین تحرک پذیری برای حفره در نیم رساناهای آلی برابر با که مربوط به
	ولتاژ اعمالی ۴۰ ولت به نمونه است، می باشد. واژگان کلیدی: روش زمان پرواز، نیم رساناهای آلی، تحرک پذیری حفره

مقدمه

مدارهای الکترونیکی مبتنی بر مواد آلی و پلیمری به دلیل ارزان قیمت بودن و سطح زیاد و همچنین داری خاصیت انعطاف پذیری آنها، دارای کاربردهای ویژه ای می باشند. در بیشتر مطالعات انجام یافته در زمینه ترابرد بار، روش زمان پرواز برای محاسبه واندازه گیری تحرک پذیری دارای بیشترین کاربرد بوده است. روش زمان پرواز مناسبتری روش در اندازه گیری های وابسته به دما ومیدان الکتریکی برای تحرک پذیری بوده است. هدف این روش برای مطالعه ترابرد

در نیم رسانای آلی توسط محاسبه واندازه گیری سرعت حاملین بار و در نهایت محاسبه تحرک پذیری حاملین بار در این مواد می باشد. حاملین بار در داخل نیم رسانای آلی در پاسخ به اعمال میدان الکتریکی حرکت می کنند. میدان الکتریکی با اعمال ولتاژ بایاس در بین دو اتصال آند وکاتد ایجاد می شود که کاتد به زمین متصل است. اتصالی که در پتانسیل بالا قرار گرفته است، از آن اتصال حاملین بار تزریق میشوند. این اتصال از دو جهت حائز اهمیت است، یکی اینکه به برقراری میدان الکتریکی کمک میکند و دیگری این که

نقطه تزریق می باشد. الکترود دیگری از طریق یک مقاومت به زمین متصل است، بطوریکه جریان خروجی ناشی از حامل ایجاد ولتاژ می کند که می تواند برای تشخیص زمان گذر مورد استفاده قرار گیرد [1].

۱- تئوری

خواص ترابرد حاملین بار برای نیم رساناهای آلی بستگی به حضور و نحوه توزیع سایتهای تله دارد. بطوریکه می دانیم تله ها نتیجه بی نظمی در مولکول ها و زنجیره های پلیمری که ناشی از ناخالصی های فیزیکی یا شیمیایی موجود در ساختار نیم رساناهای آلی می باشد. از نقطه نظر نقص های کریستالی که باعث تغییر در ترازهای انرژی می شوند و ایجاد گاف انرژی در نظریه نواری می شوند، خواص انرژی می شوند و ایجاد گاف انرژی در نظریه نواری می شوند، خواص ترابردحاملین بار در این نوع سیستم ها نیز دستخوش تغییراتی خواهد شد که مهمترین پارامتر در این موضوع جایگزیده شدن و یا دچار تله شدن در فرایند رسانش خواهد بود. البته نقص ها می توانند در نقش مراکز پراکننده در سیستم باشند.روش زمان پرواز در حال حاضر برای آزمایشات تحرک پذیری سوقی کاربردهای وسیعی دارد. مفاهیم مهم در تکنیک TOF جریان گذرا و رسانش نوری گذرا می باشند. طرح ساده آرایش تجربی TOF در شکل(۱) توصیف شده

یک لایه نازک از ماده با مقاومت زیاد و ضخامت L در بین دو الکترودA و B فشرده می شود. الکترود های A و B الکترود های مسدود کننده هستند، که به منظور جلوگیری از تزریق بار از الکترود ها به داخل نمونه مورد استفاده قرار می گیرد. الکترود های بالایی، A، متصل به منبع ولتاژ V_0 است که یک میدان الکتریکی یکنواخت در طول نمونه ایجاد می کند. الکترود پایینی B توسط مقاومت الکتریکی R به زمین متصل است.



شکل(۱): توصیف ساده تکنیک رسانش نوری TOF و مدار معادل تکنیک TOF

یک پالس تابشی کوتاه قوی توسط الکترود A جذب می شود و یک ورقه ناز کی از زوج الکترون – حفره در نزدیکی سطح نمونه ایجاد می شود. طول موج تابش طوری انتخاب می شود که ضخامت جذب δ ناشی از برانگیزش در مقایسه با ضخامت L کوچکتر باشد. برای بایاس شکل (۱) الکترون های تولید شده از نور بلافاصله توسط الکترود A جمع آوری می شوند. حفره ها در طول نمونه تحت تاثیر میدان الکتریکی بطرف الکترود پایینی سوق می یابند و جریان نوری در مقاومت نمونه R القا می شود. از شکل پالس جریان القایی، اطلاعات مربوط به ترابرد حاملین، تله شدن حاملین و رها شدن از تله می تواند تعیین شود. ترابرد الکترون نیز می تواند به سادگی توسط اعمال ولتاژ با بایاس معکوس تعیین شود.

پیش شرط های لازم برای آزمایشهای TOF که باید بصورت پایدار برقرار باشد در زیر بیان میشود:

۱-ضخامت جذب تابش فرودی باید بطور قابل توجهی کمتر از ضخامت نمونه باشد $\Delta \rangle \rangle \delta$. ۲-دوام برانگیزش (t_{ex}) باید در مقایسه با زمان گذر حاملین کمتر باشد $t_{ex} \rangle \langle t_r$.

۳-زمان گذر حاملین بار در داخل نمونه در مقایسه با زمان واهلش دی الکتریک au_{relax} نمونه کوچکتر باشد $t_T \langle \langle au_{relax}$ ۴- شرایط سیگنال کوچک باید در طول فرایند آزمایش در داخل نمونه حفظ شود.

همانطوری که در پیش شرط ها ذکر شد، فوتون های تابشی باید در نزدیکی سطح الکترود جذب شود و زوج الکترون-حفره در مجاورت الکترود بالایی ایجاد شود [4و3].

۲- مدل و شبیه سازی

مسئله با بدست آوردن وابستگی زمانی توزیع حاملین V(x=0,t) که در داخل نمونه در پاسخ به ولتاژ اعمالی $\rho(x,t)$ به آرایش TOF، که شامل الکترود آند (x=0) و الکترود کاتد (x=L) که متصل به زمین است، سروکار دارد. شکل موج V(x=0,t) در نظر گرفته می U(t) در نظر گرفته می شود[5].

$$V(x=0,t) = V.U(t) \tag{1}$$

V(x = L, t) = 0همانطوریکه می دانیم تراکم زیادی از حالتهای جایگزیده در گاف تحرک پذیری در نیم رساناهای آلی وجود دارند که تاثیر زیادی بر جنبش حاملین بار دارند، توزیع نسبی این حالتهای جایگزیده پارامتر مهمی در مطالعه ترابرد حاملین بار به شمار می آید. حالتهای جایگزیده برای حاملین آزاد در باند ترابرد مانند مراکز تسخیر عمل می کنند. در این قسمت، تئوری گذر محدود به تله برای حالتهای مربوط به توزیع تک تله ای مطالعه می شود.

برای این کار، لایه نیم رسانای آلی بصورت بره محدود به ضخامت *dx* در نظر می گیریم. شکل(۲)





رسانای آلی با یک تله

تعداد حفره ها در این بره ممکن است به علت افزایش فلوی خالص حفره ها، و یاتوسط رهاسازی گرمایی خالص حاملین بار از تله ها در داخل بره افزایش یابد. اثر باز ترکیب می تواند در داخل بره صرفنظر شود. نرخ تغییر تعداد حفره های آزاد، توسط رابطه زیر بیان می شود[6]:

(۲)

$$\frac{\partial p(x,t)}{\partial t} = -\frac{1}{e} \frac{\partial J(x,t)}{\partial x} - \frac{\partial P_t(x,t)}{\partial t}$$

$$\sum_{k=0}^{\infty} P(x,t) = \frac{1}{e} \frac{\partial J(x,t)}{\partial x} - \frac{\partial P_t(x,t)}{\partial t}$$

$$\sum_{k=0}^{\infty} P(x,t) = \frac{1}{e} \frac{\partial J(x,t)}{\partial x}$$

$$\sum_{k=0}^{\infty} P(x,t) = \frac{1}{e} \frac{\partial J(x,t)}{\partial t}$$

شامل دو مولفه است، یکی جریان سوقی حاملین بار تحت تاثیر ولتاژ بایاس اعمالی، و دیگری نتیجه پخش حاملین بار. چگالی جریان رسانش برای حفره ها از طریق رابطه زیر قابل محاسبه است.

(°)
$$J_c(x,t) = e\mu_0 p(x,t) E(x,t)$$

شـكل بالا طرح مسـئله را نشـان مى دهد. مسـئله دو بعدى جبهه موج ولتاژ گذر، يک م سئله پيچيده اى ا ست. با ايجاد شـرط اينکه بار در طول قطعه توسـط ولتاژ اعمالى کنترل مى شـود، ما در اين شـرايط مسـئله را به دو معادله ديفرانسـيل مسـتقل کاهش مى دهيم. اين فرض بادر نظر گرفتن اين واقعيت، که در هر نقطه در طول قطعه ميدان الکتريکى عمود بر طول قطعه است، صدق مى کند. تراکم بار که توسـط قانون گاوس به ميدان الکتريکى وابسـته اسـت

بنابراین چگالی بار می تواند بصورت ورقه ای که از یک نقطه به
نقطه دیگر جابجا می شود، بیان شود.
معادله پیوستگی می تواند بصورت زیر بیان شود [عو۷]:
$$\frac{\partial J}{\partial t} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$$

$$\frac{\partial x}{\partial x} + \frac{\partial t}{\partial t} = 0$$

$$\rho = ep(x,t) \tag{(f)}$$

با حذف ho از دو معادله بالا، می توان نوشت:

$$\frac{\partial J}{\partial x} = -\frac{e\partial p}{\partial t} \tag{(b)}$$

جریان، به علت اینکه تحرک پذیری الکترون ها خیلی کمتر از حفره ها می با شد، عمدتا تو سط حفره ها انجام می شود. همچنین مرتبه عددی مولفه سوق جریان حفره ها از پخش آنها زیاد می با شد. این عوامل باعث می شود که معادله جریان بصورت زیر بیان شود[10,9]:

$$J = J_{N} + J_{P}$$

$$J_{P} \rangle \rangle J_{N}$$

$$J \cong J_{P}$$

$$J_{P} = -\mu e p \frac{\partial V}{\partial x} - e D_{P} \frac{\partial p}{\partial x}$$

$$J_{P,Drift} \rangle \rangle J_{P,Diffusion}$$

$$J = J_{P} = -\mu e p \frac{\partial V}{\partial t}$$
(5)

با حذف J از دومعادله (۵) و (۶) معادله زیر را بدست می آوریم:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\mu . p . \frac{\partial V}{\partial x} \right) = \frac{\partial p}{\partial t}$$
 (Y)

بار الكتريك قطعه توسط معادله پواسون بيان مي شود:

$$\nabla^{2}V = \frac{\rho}{\varepsilon_{0}\varepsilon_{s}}$$

$$\rho = e(P-n)$$

$$P\rangle\rangle n$$

$$\frac{\partial^{2}V}{\partial x^{2}} + \frac{\partial^{2}V}{\partial y^{2}} = \frac{ep}{\varepsilon_{0}\varepsilon_{s}}$$
(A)

در حالیکه تراکم حفره تزریق شده خیلی بیشتر از تراکم الکترون می باشد، در اینصورت می توان تراکم کل بار را فقط حفره در نظر گرفت. از فرم انتگرالی قانون پواسون که همان قانون گاوس می باشد :

$$\oint \mathcal{E}\vec{E}.\partial A = Q = \rho A \tag{9}$$

برای یک قطعه مطابق شکل فوق، مولفه x میدان الکتریکی نسبت به مولفه y میدان الکتریکی می تواند صرفنظر شود. بنابر این می توان نوشت [13,12,11]:

$$E_{y}\rangle\rangle E_{x}$$

$$\vec{E} = E_{y}\hat{y} \qquad (1.)$$

$$E_{y} = \frac{ep}{\varepsilon_{0x}}$$

مولفه y میدان الکتریکی در این حالت بصورت زیر خواهد بود:

$$E_{y} = \frac{V_{0} - V(x,t)}{L} \tag{11}$$

بنابراین تراکم بار بر حسب ولتاژ عبارت خواهد بود از:

$$\rho = eP(x,t) = e\varepsilon_0\varepsilon_s \cdot \frac{V_0 - V(x,t)}{L} \tag{11}$$

با جایگذاری P در معادله(۴) معادله دیفرانسیل سیستم بدست می آید[۸و۱۴]:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \cdot (V_0 - V(x,t)) \cdot \frac{\partial V}{\partial x} \right) = \frac{\partial (V_0 - V(x,t))}{\partial t}$$

با قراردادن $V' = V_0 - V(x,t)$ معادله فوق بصورت زیر خواهد بود:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\mu . V' . \frac{\partial V'}{\partial x} \right) = \frac{\partial V'}{\partial t}$$

$$V'\frac{\partial^2 V'}{\partial x^2} + \left(\frac{\partial V'}{\partial x}\right)^2 - \frac{1}{\mu}\frac{\partial V'}{\partial t} = 0 \qquad (1\Delta)$$

18

معادله فوق معادله ترابرد برای مسئله ولتاژ پالس می باشد [۱۵و۱۶]. برای حل معادله دیفرانسیل ترابرد، با درنظر گرفتن شرایط مرزی زیر ازروش تفاضل های محدود استفاده می کنیم.

$$V(0,t) = V.U(t)$$

$$V(L,t) = 0$$
(19)

معادلات بیان شده یک روش حل تقریبی بار مسئله محاسبه تحرک پذیری به روش ولتاژ پالسی برای مدل زمان پرواز الکترونیکی می باشد. این روش برای درک دینامیک ترابرد و همچنین برای بدست آوردن پارامترهای موثر در ترابرد حاملین بار در نیم رساناهای آلی مفید است. با این وجود برای درک کامل این مسئله نیاز به حل دقیق و پیدا کردن پارامترهای اساسی می باشد[۱۷].

۳- بحث و نتایج

در بررسی نتایج مسئله، یک زمان با مقدار محدود برای حالتی که جریان سیستم صفر می باشد، وجود دارد. تاخیر زمانی نسبت معکوس با تحرک پذیری لایه ماده آلی دارد. معکوس زمان تاخیری از مشخصه های فرکانس قطعات الکترونیک مواد آلی می باشد که پارامتر مهمی به شمار می آید.

در شکل (۳) که شبیه سازی برای ولتاژ پالسی ایده آل انجام شده است. طول نمونه ۱۰۰ نانومتر و تحرک پذیری آن و ولتاژ اعمالی بر نمونه ۱۰ ولت در نظر گرفته شده است.در نمودار شکل a توزیع یک ولتاژ ایده آل بر نمونه و در شکل d توزیع ولتاژ در طول نمونه در فواصل زمانی ۱۰ نانوثانیه ودر شکل c نیز جریان برحسب زمان برای نمونه رسم شده است. تحرک پذیری ثابت، نیم رسانا بدون تله و اتصالات ایده آل فرض شده است. در واقع شرایط ایده آل برای هیچ سیستمی وجود ندارد. زیرا اولا" مقداری زمان محدود برای اینکه پالس به بیشترین مقدار خود برسد، وجود دارد، ثانیا" تحرک پذیری یک نیم رسانای آلی وابسته به تغییرات شرایط میدان موضعی می باشد و ثالثا" تله در نیم رساناهای آلی بطور کامل بر ترابرد





پالسى







شکل(۴): جریان گذرنده از نمونه بر حسب زمان

با در نظر گرفتن یک خیز خطی از صفر تا بیشترین مقدار V_0 پالس ولتاژ ما پاسخ گذرا را برای این مسئله شبیه سازی نموده ایم. شکل ۴ اثر زمان خیز محدود بر روی تاخیر اولیه را نشان می دهد. همانطوریکه از شکل ملاحظه می شودجابجایی زمان خیز با افزایش زمان بطور کامل مشهود است و مقدار جابجایی برابر با نصف زمان خیز می باشد. بنابر این برای کامل کردن رابطه تحرک پذیری نیاز به روابط زیر می باشد:

$$t_{Delay}^{Ramped} = t_{Delay}^{unramped} + \frac{T_{ramp}}{2}$$

$$t_{Delay}^{unramped} = 0.38 \frac{L^2}{\mu V_0}$$
(1Y)

در حالت خیز غیر خطی، نصف زمان خیز می تواند فاکتور تصحیح تقریبی باشد. بطور متناوب زمان تاخیری می تواند از مدت زمانی که طول می کشد تا ولتاژ به نصف ماکزیمم برسد، محاسبه شود.در این قسمت نیز طول نمونه ۱۰۰ نانومتر و تحرک پذیری آن $\mu = 0.1 cm^2 / Vs$ گرفته شده است. شکل (۵)



شکل(۵): تاثیر زمان خیز محدود بر تاخیر اولیه

در بررسی مشخصه های ولتاژ-جریان بر حسب دما مشخص شده است که تحرک پذیری نیم رسانای آلی تحت میدان قوی رفتار پول-فرانکل^۱ را از خود نشان می دهد. که بصورت رابطه زیر بیان می شود:

$$\mu = \mu_0 \exp(\frac{\beta \sqrt{E} - \Delta}{kT}) \tag{11}$$

که k ضریب ثابت بولتزمن، T دما، E میدان الکتریکی، Δ سد پرش حاملین بار در میدان صفر، μ_0 تحرک پذیری ذاتی بدون سد پرش و β ضریب وابستگی به میدان می باشد. مقدار β در حدود μ باشد. مقدار β در حدود وابستگی ترابرد، معادله ترابرد در این سیستم بصورت زیر تغییر می کند:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_0 \exp(\frac{\beta \left(\frac{\partial V'}{\partial x}\right)^{1/2}}{kT}) \cdot V' \cdot \frac{\partial V'}{\partial x} \right) = \frac{\partial V'}{\partial t} \quad (19)$$

شبیه سازی ما در دمای اتاق و ضریب β در فاصله شبیه سازی ما در دمای اتاق و ضریب β در فاصله است که $10^{-6} - 10^{-4} eV / (V / cm)^{1/2}$ نتیجه آن در شکل (۳–۱۶) ارائه شده است و همچنین طول نمونه ۱۰ در شمونه ۱۰۰ نانومتر و تحرک پذیری آن نمونه ۱۰۰ ولت در $\mu = 0.1 cm^2 / Vs$ نظر گرفته شده است.





¹ Pool-Frenkel

بطوریکه آشکار است تاخیر اولیه موثر واقع نشده است اگرچه تغییرات وابستگی میدان در نظر گرفته شده است. این هم به این دلیل است که شبیه سازی در دمای اتاق صورت گرفته است که به علت دمای پایین این اثر خیلی ناچیز می باشد. میدان الکتریکی هم برای این نوع تغییرات به اندازه کافی بالا نیست. بنابراین زمان تاخیری توسط تحرک پذیری میدان صفر باید در نظر گرفته شود. شکل (۶)

نقص ها و ناخالصی ها، که جایگزیدگی حاملین بار را اداره می کنند، نقش مهمی در ترابرد حاملین بار در نیم رساناهای آلی دارند. چگالی حالتها در این نوع نیم رساناها باعث ایجاد گاف ممنوعه در ترازهای انرژی می شود . طبیعت دقیق چگالی حالتها در نیم رسانای آلی هنوز بطور کامل مشخص نیست.تاثیر حالتهای جایگزیده کم کردن سرعت حاملین بار است، بنابراین پاسخ ولتاژ پالسی همچنین می تواند بصورت کم کردن سرعت حاملین در حضور تله ها باشد. ما می توانیم به عنوان یک مدل ساده شامل یک تراز تک تله ای که توسط طول عمر حامل T مشخص می شود را در نظر بگیریم. معادله پیوستگی جریان بصورت زیر نوشته خواهد شد:

$$\frac{1}{e}\frac{\partial J_{p}}{\partial x} + \frac{\partial P}{\partial t} = G_{p} - R_{p}$$

$$G_{p} = 0, R_{p} = \frac{P - P_{0}}{\tau}$$
(Y ·)

که $P_0^{}$ تراکم ذاتی حفره در نیم رسانا را نشان می دهد. نتیجه شبیه سازی در شکل(۷) بیان شده است.



شکل(۷): تاثیر تله تک ترازی بر روی پاسخ گذرای سیستم در دمای اتاق

منحنی آبی رنگ پاسخ گذرا در غیاب تله گیری را نشان می دهد، و طول عمر منحنی های سبز در زیر آنها نوشته شده است. ملاحظه می شود که طول عمرهای بزرگتر و یا مساوی زمان تاخیر، به دلیل اینکه حفره ها قبل از اینکه در تله گیر بیفتند طول نمونه را طی می کنند، در پاسخ قابل اغماض می باشند. با کاهش طول عمر حامل، جریان حالت پایا نیز کاهش می یابد زیرا تعداد حاملین شرکت کننده در رسانش و ترابرد توسط تله گیری کاهش می یابد.

۴- نتیجه گیری

در این مقاله تاثیر میدان الکتریکی بر روی تحرک پذیری در دو ولتاژ ۱۰۰ ولت و ۵۰ ولت برای آرایش زمان پرواز بررسی شد و مشاهده گردید که تحرک پذیری حفره در ۱۰۰ ولت نسبت به سایر ولتاژها را دارد.

تحرک پذیری حفره، که در ولتاژهای مختلف در دمای اتاق بررسی شد بهترین و مناسب ترین تحرک پذیری برای حفره در نیم رساناهای آلی برابر با که مربوط به ولتاژ اعمالی ۴۰ ولت به نمونه است، می باشد.

منابع

[1] Kreouzis, T., Poplavskyy, D., Tuladhar, S., Nelson J., Campbell A.J. Temperature and field dependence of hole mobility in poly(9,9-dioctylfluorene). *Phys.Rev. B.* 73(2), 801-809 (2016).

[2] Majewski, L. A., Schroeder, R., Voigt, M., Grell, M. Low voltage organic transistors on a polymer. *J. Phys. D.* 37(7), 337-347,(2014).

[3] Majewski, L. A., Schroeder, R., Grell, M., Turner, M. L. J. High capacitance organic field – effect transistors with [12] Shin, K., Yang, C., Yang, S. Y., Jeon, H. Effect of polymer gate dielectrice roughness on pentacene field-effect transistors. *Appl. Phys. Lett.* 88, 072109, 351-362 (2016).

[13] Andrey, Y., Sosorev, M. Simple charge transport model for efficient search of high-mobility organic semiconductor crystals. *Materials & Design.* 192, 111-119 (2020).

[14] Veysel Tunc, A., De Sio, A., Riedel, D., Deschler, F., Da Como, E., Parisi, J., von Hauff, E. Molecular doping of low-bandgappolymer: fullerene solar cells: Effects on transport and solar cells, *Org. Electron.*, 13,290-299 (2017).

[15] Panda, A., Muniz, S. M. Smart home with neural network based object detection, *Big Data and Computing Visions*, 2(1), 40 – 48 (2022).

[16] Maennig, B., Pfeiffer, M., Nollau, A., Zhou, X., Leo K., Simon, P. Controlled ptype doping of polycrystalline and amorphous organic layers: Self-consistent description of conductivity and field-effect mobility by a microscopic percolation model, *Phys. Rev. B*, 64, 195-208 (2018).

[17] Osterbacka, R., Pivrikas, A. Effect of 2-D Delocalization on Charge Transport and Recombination in Bulk-Heterojunction Solar Cells, *IEEE in Quantum Electronics*, 16, 1738-1745 (2017). modified gate insulator surface. Appl. Phys. 96(6), 435–447 (2019).

[4] Steudel, S., Vusser, S. D., Jonge, S. D., Janssen, D., Verlaak, SInfluence of the dielectric roughness on the performance of pentanene transistors. *Appl. Phys. Lett.* 85, 302-311 (2015).

[5] Mahmoudloo, A., Ahmadi, S. Variable range hopping transport characteristics of the charge carriers in homogenous amorphous organic semiconductors. *Optik.* 127, 505- 513 (2016).

[6] Evgeny, L. Pankratov. On increasing of density of field-effect heterotransistors in the framework of a c-multiplier, *Journal of applied research on industrial engineering*, 11(2), 92-118 (2022).

[7] Schrader, M., Körner, C., Elschner, C., Andrienko, D. Charge transport in amorphous and smectic oligothiophenes. *J. Mater. Chem.* 22, 119-124 (2020).

[8] Liu, C., Huang, K. A unified understanding of charge transport in organic semiconductors the importance of attenuated delocalization for the carriers. *Materials Horizons*. 4, 233-240 (2017).

[9] Sari, I. U., Ak, U. Machine efficiency measurement in industry 4.0 using fuzzy data envelopment analysis, *Journal of Fuzzy Extension & Applications*, 3(2), 78-89 (2022).

[10] Street, R., Northrup, N., Salleo, J. E. Transport in polycrystalline polymer thin – film transistors. *phy. Rev. B*, 71. 16, 337-348 (2013).

[11] Fritz S. E., Kelley T. W., Frisbie C. D. Effect of dielectric roughness on performance of pentacene TFTs with a polymeric smoothing layer. *J. Phys. Chem.B.* 109, 10574, 708-714 (2019).



Study of Hole Transport in Organic Semiconductors with Electronic time-of-flight Method

¹ Ali Mahmoudloo

^{1*} Department of Physics Education, Farhangian University, P.O. Box 14665-889, Tehran, Iran

