

## بررسی اثر بازدارندگی ترکیب آلی "2-((دی هیدروآبی تیلامین)(متیل 6- متوکسی فنول))" بر خوردگی فولاد کم کربن در محلول آب دریا

محمدعلی محمدیان<sup>1</sup>، محمد مهمیدوند<sup>2</sup>

<sup>1</sup>گروه ملی صنعتی فولاد ایران

<sup>2</sup>دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهواز

### چکیده

تأثیر ترکیب آلی "2-((دی هیدروآبی تیلامین)(متیل 6- متوکسی فنول))" به عنوان بازدارنده‌ی خوردگی فولاد کم کربن در محلول آب دریا 3/5 درصد NaCl با استفاده از منحنی پلاریزاسیون و تکنیک‌های طیف سنجی امپدانس الکتروشیمیایی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که بازدهی ممانعت کننده با افزایش غلظت افزایش یافت. براساس مطالعات پلاریزاسیون مشخص شد که بازدارنده DMP از نوع آندی و کاتدی است. با توجه به اطلاعات امپدانس خوردگی بازدارنده روی سطح آلیاژ بوسیله مدار معادل آنالیز شد. جذب DMP روی فولاد میکروآلیاژ از قوانین جذب همدمای لانگمیر تبعیت می‌کند. انرژی آزاد جذب بازدارنده نشان داد که بازدارندگی خوردگی DMP توسط فرآیند جذب شیمیایی کنترل می‌شود.

**کلمات کلیدی:** بازدارنده‌ی خوردگی، راندمان بازدارندگی، فولاد کم کربن، 2-((دی هیدروآبی تیلامین)(متیل 6- متوکسی فنول))، آب دریا.

<sup>1</sup>Ma.Mohamadian@yahoo.com

<sup>2</sup>M.Mahmidvand@gmail.com

## مقدمه

استفاده از بازدارنده‌ها یکی از موثرترین روش‌ها برای حفاظت فلزات در مقابل خوردگی در محیط‌های خوردنده است [1]. فولادهای کم کربن بیشترین کاربرد در صنعت را بخود اختصاص داده‌اند بهمین دلیل از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است از جمله کاربرد آنها در ساخت قطعات، ماشین‌ها، خطوط لوله انتقال آب، صنایع ساختمان و غیره را می‌توان نام برد. بازدارنده متشکل از ترکیباتی است که بر پایه توانایی جذب مولکول‌های آنهاست، که سطح فلز را از محیط خوردنده جدا می‌کند [2-6]. مولکول‌های بازدارنده توسط جذب شیمیایی، جذب فیزیکی یا کمپلکس به سطح فلز پیوند می‌خورند [7 و 8]. به طور کلی، فرایند جذب بازدارنده تحت تاثیر ماهیت، سطح فلز، ساختار شیمیایی بازدارنده‌های آلی، توزیع مولکول، نوع محلول خوردنده و نوع واکنش بین مولکول‌های آلی و سطح فلز است [9 و 10]. گروه‌های مختلفی از ترکیبات آلی به عنوان بازدارنده برخوردارگی فولاد کربنی گزارش شده است. ترکیبات مختلف فیل دار به طور گسترده مورد مطالعه قرار گرفته است [10-12].

در این مقاله، اثر افزودن "2-((دی هیدروآبی تیلامین)(متیل 6- متوکسی فنول))" در بازدارندگی خوردگی فولاد کم کربن در اسید هیدروکلریک 1 مولار با استفاده از طیف سنجی امپدانس الکتروشیمیایی (EIS) و پلاریزاسیون پتانسیودینامیک مورد مطالعه قرار گرفت.

## مواد و روش تحقیق

ترکیب شیمیایی الکتروود کاری، فولاد کم کربن که با استفاده از کوانتومتری، ترکیب شیمیایی آن در جدول (1) نشان داده شده است. به الکتروود فولادی اتصال زده شد و سپس مانع گردید و بطور مکانیکی با کاغذ سمباده SiC از شماره 400 تا 2500 پولیش گردید و در نهایت به منظور استفاده در پیل الکتروشیمیایی به وسیله استون و آب مقطر شسته و خشک گردیدند. بازدارنده "2-((دی هیدروآبی تیلامین)(متیل 6- متوکسی فنول))" (DMP) از Merck خریداری شد. محلول خوردنده با استفاده از NaCl (Merck) ساخته شد. غلظت بازدارنده در محدوده  $2/2 \times 10^{-6}$  تا  $1/8 \times 10^{-5}$  در محلول  $3/5 \text{ NaCl}$  درصد استفاده شد و در آب دوبار تقطیر آماده شدند.

به منظور بررسی رفتار خوردگی فولاد کم کربن با غلظت‌های مختلف بازدارنده در محلول  $3/5 \text{ NaCl}$  درصد از یک پیل الکتروشیمیایی سه الکترودی با ظرفیت 500 mL برای آزمایشات پلاریزاسیون و طیف نگاری امپدانس الکتروشیمیایی (EIS) استفاده شد. از الکتروود کالومل فوق اشباع (SCE) به عنوان الکتروود مرجع و الکتروود پلاتین به منظور الکتروود کمکی استفاده شد. همه آزمایشات الکتروشیمیایی با استفاده از دستگاه PSTAT2273 انجام شد. آزمایشات پلاریزاسیون پتانسیودینامیک با نرخ روبش  $\text{mV/s}$  0/5 از پتانسیل ابتدایی  $-500\text{mV}$  پایینتر از پتانسیل مدار باز تا پتانسیل نهایی  $500\text{mV}$  بالاتر از پتانسیل

مدار باز جهت تعیین پتانسیل و دانسیته جریان خوردگی انجام شد. آزمایش طیف نگاری امپدانس الکتروشیمیایی (EIS) در محدوده فرکانس 10 KHz تا 10 mHz و با دامنه 5 mV حول پتانسیل مدار باز انجام شد.

## نتایج و بحث

منحنی‌های پلاریزاسیون آندی و کاتدی فولاد کم کربن در محلول آب دریا در حضور و عدم حضور غلظت‌های مختلف DMP در دمای 25 درجه سانتیگراد در شکل (2) نشان داده شده است. به طور واضح شیب واکنش‌های آندی و کاتدی منحنی‌های پلاریزاسیون فولاد با افزایش غلظت بازدارنده DMP پلاریزه گردید. این نتایج نشان می‌دهد که نه تنها افزودن بازدارنده‌ها انحلال آندی را کاهش می‌دهد بلکه مانع واکنش تکامل هیدروژن نیز می‌شود.

پارامترهای الکتروشیمیایی مانند پتانسیل خوردگی ( $E_{corr}$ )، دانسیته جریان خوردگی ( $i_{corr}$ )، شیب منحنی پلاریزاسیون آندی ( $\beta_a$ ) و کاتدی ( $\beta_c$ ) با استفاده از اکستراپولاسیون منحنی‌های پلاریزاسیون بدست آمد. ( $\eta_p$  %) را می‌توان بوسیله رابطه (1) نمایش داد:

$$\eta_p (\%) = \{ (i_{corr}^0 - i_{corr}) / i_{corr}^0 \} \times 100 \quad (1)$$

که در آن  $i_{corr}$  و  $i_{corr}^0$  چگالی جریان خوردگی در حضور و عدم حضور بازدارنده است که در جدول (2) آورده شده است و راندمان بازدارندگی را نشان می‌دهد [13].

با توجه به تئوری الکتروشیمی، مقاومت پلاریزاسیون ( $R_p$ ) با دانسیته جریان خوردگی رابطه عکس دارد و با استفاده از رابطه (2) Stern-Geary محاسبه می‌شود [14]:

$$R_p = \beta / i_{corr} \quad (2)$$

$$\beta = (\beta_a \beta_c) / (2.303 (\beta_a + \beta_c))$$

پارامترهای الکتروشیمی ( $\beta_a$ ،  $\beta_c$ ،  $E_{corr}$ ،  $i_{corr}$ ،  $R_p$  و  $\eta_p$ %) به دست آمده از اندازه‌گیری DMP در محلول آب دریا در حضور و عدم حضور غلظت‌های مختلف از ترکیبات مورد نظر در 25 درجه سانتیگراد بروی فولاد کم کربن در جدول (2) را نشان می‌دهد.

داده‌های جدول را می‌توان به شرح زیر تفسیر کرد:

- مقادیر  $E_{corr}$  در ابتدا با افزایش میزان بازدارنده به سمت مقادیر منفی میل پیدا کرد و سپس میزان آن افزایش یافت که این نشان دهنده کاتدی و آندی بودن بازدارنده است.

• مقادیر  $\eta_p(\%)$ ، همراه با مقادیر  $i_{corr}$  و  $R_p$  نشان می‌دهد که با افزودن DMP به محلول اسید هیدروکلریک موجب افزایش مقاومت به خوردگی فولاد می‌شود و حداکثر راندمان بازدارندگی آن در غلظت  $10^{-5} \times 1/8$ ، 87% است.

طیف سنجی امپدانس الکتروشیمیایی (EIS)، روش غیر مخرب و قدرتمند الکتروشیمیایی برای توصیف واکنش‌های الکتروشیمیایی در روابط فلز/الکترولیت و تشکیل محصولات خوردگی استامپدانس معمولاً در شکل (3) منحنی‌های نایکوئیست، شکل (4) بد و فاز نشان داده می‌شود [15].

رفتار خوردگی فولاد کم کربن در محلول 3/5 درصد NaCl در حضور و عدم حضور بازدارنده EIS در  $25^\circ\text{C}$  بعد از 24 ساعت غوطه‌ور شدن در محلول برای مورد بررسی قرار گرفت.

پردازش اطلاعات توسط نرم افزار Zview 2.80 انجام شد و میزان خطا به طور متوسط در حدود 3٪ در تمام موارد است. مقادیر عناصر در مدار معادل که در شکل (5) نشان داده شده در جدول (3) آمده است. در این مورد EIS، راندمان بازدارندگی ( $\eta_z(\%)$ ) توسط مقاومت شارژ انتقال، همانطور که در معادله رابطه (3) آمده است محاسبه شد [19]:

$$\eta_z(\%) = \{(R_{ct} - R_{ct}^0)/R_{ct}\} \times 100 \quad (3)$$

که در آن  $R_{ct}^0$ ،  $R_{ct}$  بترتیب مقاومت شارژ انتقال بدون حضور بازدارنده و با حضور بازدارنده است. بر اساس اطلاعات جدول (3) واضح است که مقادیر  $R_{ct}$  با مقادیر ظرفیت اثر متقابل دارند (با افزایش غلظت DMP مقدار مقاومت انتقال بار افزایش یافته در حالیکه ظرفیت کاهش میابد). همچنین مقادیر فاکتور جزئی  $n$  بیانگر رفتار بازدارنده است. که به لایه محافظی که روی سطح فولاد تشکیل شده بستگی دارد. با بررسی میزان  $n$  در جدول (3) درمی یابیم که با افزایش غلظت بازدارنده فاکتور جزئی در مقایسه با نمونه خام افزایش میابد که این مورد نشان دهنده کاهش غیر یکنواختی سطح ناشی از جذب بازدارنده در اغلب مناطق فعال سطح است [18]. لایه دوگانه‌ای که بین سطح فلز و محلول تشکیل می‌شود به ظرفیت الکتریکی آن وابسته است. با جذب DMP روی سطح الکتروود میزان ظرفیت الکتریکی به شدت کاهش یافت و این به دلیل جانشینی بازدارنده روی سطح الکتروود به جای مولکول‌های آب و دیگر یون‌های معمول است. بنابراین کاهش ظرفیت با افزایش میزان غلظت به تشکیل لایه محافظ در سطح الکتروود بر می‌گردد. ضخامت لایه محافظ با افزایش غلظت بازدارنده افزایش میابد. این تمایل منطبق با معادله هلمهولتز است که براساس رابطه (4) بدست می‌یابد [19]:

$$C_{dl} = (\epsilon_0 \epsilon / e) S \quad (4)$$

که در اینجا  $\epsilon$  ضخامت لایه محافظ است،  $\epsilon$  ثابت دی الکتریک محیط،  $\epsilon_0$  ثابت دی الکتریک در خلاء و  $S$  مساحت موثر سطح الکتروود است. که این نتایج با میزان بازدهی بازدارنده مطابقت می کند بر اساس جدول (3) با افزایش غلظت بازدارنده، میزان بازدهی تا 86% افزایش می یابد.

بازدارندگی خوردگی در ترکیبات آلی، عمدتاً به دلیل توانایی ترکیب در جذب سطحی بر روی سطح فلز به شکل یک فیلم محافظ است. رسم ایزوترم در توصیف رفتار جذب بازدارنده مهم است که بیان کننده ماهیت تعامل فلز با بازدارنده است. مقدار درجه پوشش سطح ( $\theta$ ) مربوط به غلظت های مختلف DMP در  $25^\circ\text{C}$  پس از 24 ساعت غوطه وری بعنوان بهترین توصیف فرآیند جذب مورد استفاده قرار گرفت. در مطالعه حاضر مقدار  $\theta$  با استفاده از نتایج امپدانس با توجه به رابطه (5) محاسبه شد [20]:

$$\theta = \{(i_{\text{corr}} - i_{\text{corr}}^0)/i_{\text{corr}}\} \quad (5)$$

که در آن  $i_{\text{corr}}$  و  $i_{\text{corr}}^0$  دانسیته جریان با و بدون بازدارنده خوردگی است. نتایج مشاهده شده برای DMP در محلول اسید هیدروکلریک 1 مولار متناسب با جذب لانگمیر همدم (شکل 6)، توسط رابطه (6) به دست آمده است [21]:

$$C_{\text{inh}}/\theta = (1/K_{\text{ads}}) + C_{\text{inh}} \quad (6)$$

که در آن  $\theta$  درجه پوشش سطح،  $C_{\text{inh}}$  غلظت بازدارنده در الکترولیت است و  $K_{\text{ads}}$  ثابت تعادل فرآیند جذب است. که ضریب همبستگی خطی ( $R$ ) نزدیک به 1 است و شیب خط مستقیم نیز نزدیک به 1، که نشان می دهد که جذب DMP از محلول 1 مولار اسید هیدروکلریک بر روی فولاد از مدل لانگمیر و نمایش ویژگی جذب تک لایه تبعیت می کند. از رهگیری خط مستقیم محور  $C_{\text{inh}}/\theta$ ، مقدار  $K_{\text{ads}}$  را می توان محاسبه کرد. ثابت تعادل روند جذب ( $K_{\text{ads}}$ ) به انرژی آزاد استاندارد جذب وابسته است ( $\Delta G_{\text{ads}}^0$ ) که بوسیله رابطه (7) محاسبه می شود [7]:

$$K_{\text{ads}} = 1/55.5 \exp(-\Delta G_{\text{ads}}^0/RT) \quad (7)$$

که در آن  $R$  ثابت جهانی گاز و  $T$  دمای مطلق است. مقدار  $55/5$  در معادله بالا، غلظت آب در محلول در  $10^{-1} \text{ mol l}^{-1}$  است. در  $25^\circ\text{C}$  درجه سانتیگراد،  $\Delta G_{\text{ads}}^0$  محاسبه شده برای ترکیب DMP  $44/04 \text{ kJ mol}^{-1}$  است که مقدار منفی  $\Delta G_{\text{ads}}^0$  نشان می دهد جذب DMP یک فرایند خودبخودی است. به طور کلی، در صورتی که مقدار مطلق  $\Delta G_{\text{ads}}^0$  کمتر از  $20^{-1} \text{ kJ mol}^{-1}$  نوع جذب به عنوان جذب فیزیکی در نظر گرفته شده است و رفتار بازدارنده به تعامل الکترواستاتیک بین مولکول های آلی و اتم آهن نسبت داده می شود. و هنگامی که مقدار مطلق  $\Delta G_{\text{ads}}^0$  بالاتر از  $40^{-1} \text{ kJ mol}^{-1}$  باشد، جذب می تواند به عنوان جذب شیمیایی دیده شود. در این فرآیند، پیوند کووالانسی است که به اشتراک گذاری و یا انتقال مولکول بازدارنده به

سطح فلز، کمک می کند [7]. بر اساس مطالب فوق  $\Delta G_{ads}^0$  به دست آمده در این تحقیق نشان می دهد که مکانیزم جذب DMP بر روی سطح فولاد جذب شیمیایی (مولکولی) است.

### نتیجه گیری

بازدارندگی خوردگی "2-((دی هیدروآبی تیلامین)(متیل 6-متوکسی فنول))" (DMP) برای فولاد کم کربن در محلول 1 مولار اسید هیدروکلریک با استفاده از آزمون های امپدانس الکتروشیمیایی و پلاریزاسیون پتانسیوداینامیک مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان دادند که DMP بازدارندگی موثری بر آلیاژ در محلول آب دریا (3/5 % NaCl) دارد و بازدهی این بازدارنده با افزایش غلظت بازدارنده افزایش می یابد. با توجه به منحنی های تافل در می یابیم که ترکیب آلی DMP از دو نوع آندی و کاتدی می باشد. آزمون امپدانس نشان داد که حلقه خازنی در فرکانس های بالا مربوط به فرایند انتقال بار خوردگی فلز و لایه دوگانه در فرکانس های پایین است. فرآیند خوردگی در حضور بازدارنده به صورت جذب DMP روی سطح آلیاژ روی می دهد که با استفاده از مدل لانگمیر فرایند جذب مورد بررسی قرار گرفت. بر اساس انرژی آزاد جذب و اندازه گیری ان به این نتیجه می رسیم که مکانیزم جذب DMP روی سطح فولاد در محلول 3/5 % NaCl به صورت جذب شیمیایی است.

### تشکر و قدردانی

نویسندگان بدین وسیله از همکاری و مساعدت شرکت گروه ملی صنعتی فولاد ایران به ویژه آقایان مهندس محمد حسین دانش، مدیر کارخانه فولادسازی و مهندس علی عسکر ابراهیم زاده، مدیر پروژه ها و مهندس علیرضا شالبافی، مدیر پژوهش تشکر و قدردانی خود را اعلام می دارند.

### مراجع

- [1] Hong Ju, Zhen-Peng Kai, Yan Li (2008) Aminic nitrogen-bearing polydentate Schiff base compounds as corrosion inhibitors for iron in acidic media: A quantum chemical calculation, Corrosion Science 50: 865–871.
- [2] Sudhish Kumar Shukla, M.A. Quraishi (2009) 4-Substituted anilinomethylpropionate: New and efficient corrosion inhibitors for mild steel in hydrochloric acid solution, Corrosion Science 51: 1990–1997.
- [3] M. Abdallah (2003) Corrosion behavior of 304 stainless steel in sulphuric acid solutions and its inhibition by some substituted pyrazolones, Materials Chemistry and Physics 82: 786–792.
- [4] F. Bentiss, M. Traisnel, M. Lagrenee (2000) The substituted 1,3,4-oxadiazoles: a new class of corrosion inhibitors of mild steel in acidic media, Corrosion Science 42: 127–146.

- [5] I.B. Obot , N.O. Obi-Egbedi (2010) Theoretical study of benzimidazole and its derivatives and their potential activity as corrosion inhibitors, *Corrosion Science* 52: 657–660.
- [6] A. Dafali, B. Hammouti, R. Mokhlisse, S. Kertit (2003) Substituted uracils as corrosion inhibitors for copper in 3% NaCl solution, *Corrosion Science* 45: 1619–1630.
- [7] Yong-Ming Tang, Wen-Zhong Yang, Xiao-Shuang Yin, Ying Liu, RongWan, Jin-TangWang (2009) Phenyl-substituted amino thiadiazoles as corrosion inhibitors for copper in 0.5M H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> , *Materials Chemistry and Physics* 116: 479–483.
- [8] Ehteram A. Noor (2009) Evaluation of inhibitive action of some quaternary N-heterocyclic compounds on the corrosion of Al–Cu alloy in hydrochloric acid, *Materials Chemistry and Physics* 114: 533–541.
- [9] Dimitra Sazou (2001) Electrodeposition of ring-substituted polyanilines on Fe surfaces from aqueous oxalic acid solutions and corrosion protection of Fe, *Synthetic Metals* 118: 133–147.
- [10] Najoua Labjar, Mounim Lebrini, Fouad Bentiss, Nour-Eddine Chihib, Souad El Hajjaji, Charafeddine Jama (2010) Corrosion inhibition of carbon steel and antibacterial properties of aminotris-(methylenephosphonic) acid, *Materials Chemistry and Physics* 119: 330–336.
- [11] Fouad Bentiss, Mounim Lebrini, Hervé Vezin, Michel Lagrenée (2004) Experimental and theoretical study of 3-pyridyl-substituted 1,2,4-thiadiazole and 1,3,4-thiadiazole as corrosion inhibitors of mild steel in acidic media, *Materials Chemistry and Physics* 87: 18–23.
- [12] M.A. Hegazy, H.M. Ahmed, A.S. El-Tabei (2011) Investigation of the inhibitive effect of p-substituted 4-(N,N,N-dimethyldodecylammonium bromide)benzylidenebenzene-2-yl-amine on corrosion of carbon steel pipelines in acidic medium, *Corrosion Science* 53: 671–678.
- [13] R. Ravichandran, S. Nanjundan, N. Rajendran (2004) Effect of benzotriazole derivatives on the corrosion of brass in NaCl solutions, *Applied Surface Science* 236 : 241–250.
- [14] Stansbury E, Buchanan R (1998) *Fundamentals of electrochemical corrosion*. ASM International, Materials Park, OH, p 248.
- [15] S.J. Yuan, S.O. Pehkonen (2007) Surface characterization and corrosion behavior of 70/30 Cu–Ni alloy in pristine and sulfide-containing simulated seawater, *Corrosion Science* 49: 1276–1304.
- [16] A. Farzaneh, M. Ehteshamzadeh, M. Mohammadi (2010) Corrosion performance of the electroless Ni–P coatings prepared in different conditions and optimized by the Taguchi method, *J Appl Electrochem*.
- [17] Xiao-Zhong Zhou, Chu-Ping Deng, Yu-Chang Su (2010) Comparative study on the electrochemical performance of the Cu–30Ni and Cu–20Zn–10Ni alloys, *Journal of Alloys and Compounds* 491: 92–97.
- [18] M. Ehteshamzadeh, A.H. Jafari, Esmaeel Naderi, M.G. Hosseini (2009) Effect of carbon steel microstructures and molecular structure of two new Schiff base compounds on inhibition performance in 1M HCl solution by EIS, *Materials Chemistry and Physics* 113 : 986–993.

[19]Esmaeel Naderi, M. Ehteshamzadeh, A.H. Jafari, M.G. Hosseini (2010) Effect of carbon steel microstructure and molecular structure of two new Schiff base compounds on inhibition performance in 1M HCl solution by DC, SEM and XRD studies, Materials Chemistry and Physics 120: 134–141.

[20]Waheed A. Badawy, Khaled M. Ismail, Ahlam M. Fathi (2006) Corrosion control of Cu–Ni alloys in neutral chloride solutions by amino acids, Electrochimica Acta 51: 4182–4189.

[21]S.S. El-Egamy (2008) Corrosion and corrosion inhibition of Cu–20%Fe alloy in sodium chloride solution, Corrosion Science 50: 928–937.

جدول 1. آنالیز شیمیایی نمونه فولادی.

عنصر	C	Si	Mn	P	S	Al	Fe
Wt%	0.21	0.38	0.05	0.09	0.05	0.01	باقی مانده

جدول 2. پارامترهای پلاریزاسیون و بهره‌وری بازدارنده مربوط به فولاد حاوی غلظت‌های مختلف از بازدارنده.

Name of inhibitor	Inhibitor concentration (M)	$E_{corr}$ (mV)	$i_{corr}$ (mA cm <sup>-2</sup> )	$\beta_a$ (mV dec <sup>-1</sup> )	$\beta_c$ (mV dec <sup>-1</sup> )	$\eta_p$ (%)
Blank	0	-476	4.25	140.73	374.53	–
DMP	$2.2 \times 10^{-6}$	-468	1.66	134.55	378.36	60.94
	$4.5 \times 10^{-6}$	-456	1.23	136.13	345.66	71.06
	$8.9 \times 10^{-6}$	-435	0.97	146.91	311.24	77.18
	$1.3 \times 10^{-5}$	-428	0.75	152.32	288.43	82.35
	$1.8 \times 10^{-5}$	-419	0.55	123.78	340.95	87.06

جدول 3. پارامترهای امپدانس خوردگی فولاد در حضور و عدم حضور غلظت‌های مختلف از بازدارنده.

Inhibitor concentration (M)	$R_s$ ( $\Omega$ )	$R_1$ ( $\Omega$ )	$C_1$ ( $\mu\text{Fcm}^{-2}$ )	$n_1$	$\eta_z$ (%)
blank	5.14	5.51	534.99	0.754	–
$2.2 \times 10^{-6}$	5.20	13.96	382.76	0.826	60.50
$4.5 \times 10^{-6}$	6.13	18.43	349.14	0.833	70.08
$8.9 \times 10^{-6}$	5.54	26.01	349.14	0.846	78.80
$1.3 \times 10^{-5}$	5.52	31.28	179.75	0.854	82.37
$1.8 \times 10^{-5}$	5.05	39.86	136.75	0.862	86.17



