

به نام خداوند جان و خرد

طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی

(EIS)

مبانی و کاربردها

دکتر میر قاسم حسینی (استاد تمام شیمی فیزیک دانشگاه تبریز)

ایرج احدزاده (استادیار شیمی فیزیک دانشگاه تبریز)

چاپ دوم – ۱۳۹۶

سرشناسه	:	حسینی، میرقاسم، ۱۳۴۹
عنوان و نام پدیدآور	:	طیف سنجی امپدانس الکتروشیمیایی (EIS) مبانی و کاربردها / میرقاسم حسینی، ایرج احدزاده
مشخصات نشر	:	تهران: انجمن خوردگی ایران، ۱۳۸۹ چاپ اول، چاپ دوم ۱۳۹۶
مشخصات ظاهری	:	۳۴۳ ص.
شابک	:	۹۷۸-۶۰۰-۵۵۸۳-۰۹-۰ چاپ اول، چاپ دوم ۶-۴۶-۵۵۸۳-۶۰۰-۹۷۸
وضعیت فهرست نویسی	:	فیپا
موضوع	:	طیف سنجی امپدانس
موضوع	:	الکتروشیمی، شیمی فیزیک
شناسه افزوده	:	انجمن خوردگی ایران، احدزاده، ایرج ۱۳۵۸
رده بندی دیویی	:	۵۴۳/۴۲۲
شماره کتابشناسی ملی	:	۲۱۴۳۱۷۱



نام کتاب:	طیف سنجی امپدانس الکتروشیمیایی (EIS) مبانی و کاربردها
مؤلفین:	دکتر میرقاسم حسینی و ایرج احدزاده
صفحه آرای:	ایرج احدزاده
طراحی جلد:	محمد تفرشی
ناشر:	انجمن خوردگی ایران
سال چاپ:	چاپ اول: ۱۳۸۹ و چاپ دوم: ۱۳۹۶
تیراژ:	۱۰۰۰ جلد
چاپ:	سامان
شابک:	۹۷۸-۶۰۰-۵۵۸۳-۰۹-۰

قیمت: ۲۲۰۰۰ تومان

تمامی حقوق محفوظ و متعلق به ناشر و مؤلفین می باشد

(برای کسب اطلاعات بیشتر در مورد نحوه چاپ کتاب با انتشارات انجمن خوردگی ایران با تماس حاصل نمایید)

انجمن خوردگی ایران (ناشر): تهران، خیابان انقلاب، میدان فردوسی، خیابان شهید عباس موسوی (فرصت)، خیابان بهبهان، پلاک ۱۱ طبقه ۲، تلفن: ۸-۸۸۲۷۳۳۴، دورنگار: ۸۸۳۴۴۲۸۷

فهرست

مقدمه مولفان (چاپ اول)

مقدمه مولفان (چاپ دوم)

پیشگفتار ناشر

فصل اول: مروری بر تئوری مدارات جریان متناوب (AC)

۱	مقدمه
۱	۱-۱- مفاهیم بنیادی - مفهوم تحریک، پاسخ و تحلیل خطی
۶	۱-۲- قانون اهم، امپدانس و ادمیتانس
۹	۱-۳- جریان AC
۱۷	۱-۴- امپدانس مختلط و فازور
۲۸	۱-۵- برخی عناصر مدارات AC و رفتار امپدانس آنها
۷۱	۱-۶- ادمیتانس
۷۳	۱-۷- روشهای نمایش امپدانس
۱۰۱	مراجع

فصل دوم: تعمیم اندازه گیری امپدانس به سیستم های

الکتروشیمیایی

۱۰۳	مقدمه
۱۰۳	۲-۱- مرور برخی از روشهای DC اندازه گیری در الکتروشیمی
۱۱۹	۲-۲- مفهوم مدارات و عناصر معادل الکتریکی برای سیستمهای الکتروشیمیایی
۱۳۱	۲-۳- سایر عناصر مداری برای تحلیل امپدانس
۱۵۳	۲-۴- رفتار القایی
۱۵۹	۲-۵- معایب استفاده از مدارات معادل
۱۶۳	مراجع

فصل سوم: دستگاه وری و روش های پردازش داده ها در EIS

۱۶۹	مقدمه
۱۷۰	۳-۱ سل الکتروشیمیایی
۱۷۲	۳-۲- جوانب مختلف اندازه گیری های امپدانس الکتروشیمیایی
۱۷۵	۳-۳- تکنیکهای مختلف اندازه گیری امپدانس
۱۹۶	۳-۴- روش تقویت کننده ی قفل شونده (Lock-in)
۲۰۱	۳-۵- روش تحلیلگر پاسخ فرکانس (FRA)
۲۰۷	۳-۶- منابع عمده خطا و داده های نادرست در EIS
۲۱۰	۳-۷- تست کرامرز - کرونیگ (KK) به عنوان محکی برای صحت و دقت داده های امپدانس
۲۲۱	۳-۸- پیشرفتهای اخیر در دستگاهوری EIS
۲۲۳	مراجع

فصل چهارم : کاربردهای روش EIS

۲۲۷	مقدمه
۲۲۷	۴-۱- خوردگی فلزات، بازدارنده ها و پوششها
۲۲۹	۴-۱-۱- تعیین سرعت خوردگی یکنواخت
۲۳۶	۴-۱-۲- بازدارنده های خوردگی
۲۴۰	۴-۱-۳- بررسی اثرات بین بازدارنده ها
۲۴۱	۴-۱-۴- خوردگی فولاد ضد رنگ
۲۴۱	۴-۱-۵- خوردگی موضعی
۲۴۳	۴-۱-۶- خوردگی تنشی
۲۴۶	۴-۱-۷- خوردگی حفره ای
۲۵۳	۴-۱-۸- بررسی پوششها
۲۷۴	۴-۱-۹- خوردگی فولاد در بتن مسلح
۲۷۷	۴-۲- بررسی خواص دی الکتریکی و الکتریکی شیشه ها و سرامیک های معدنی
۲۸۲	۴-۳- باتری ها
۲۹۲	۴-۴- مطالعه خواص مواد
۲۹۳	۴-۵- سلولهای سوختی
۲۹۸	۴-۶- نانو فناوری
۲۹۹	۴-۷- تعیین مکانیزم واکنش های الکتروشیمیایی
۳۱۳	۴-۸- دور نمای روش EIS
۳۱۵	مراجع
۳۲۱	پیوست
	واژه نامه انگلیسی - فارسی

مقدمه مولفان

تئوری امپدانس قسمتی از تئوری جامع مدارات الکتریکی است که عمدتاً تحت پوشش رشته مهندسی برق و الکترونیک می باشد. طیف سنجی امپدانس الکتروشیمیایی که به اختصار EIS خوانده می شود^۱، در حقیقت یک زمینه کاربردی خاص از تئوری فوق برای سیستمهای الکتروشیمیایی است. بنابراین مبحث EIS یک کاربرد و مفهوم بین رشته ای^۲ به حساب می آید. بدین جهت برای درک بهینه و استفاده موثر از روش فوق دانش کافی و به نسبت عمیق از هر دو زمینه برق و شیمی (مخصوصاً الکتروشیمی) اجتناب ناپذیر بنظر می رسد. اساس این روش در طول سالهای قبل از جنگ جهانی دوم (دهه ۴۰) و در طی دوران جنگ توسط آقای ج. ر. مکدونالد^۳ پایه ریزی شده و برای کاربردهای مهندسی برق، سیستمهای شیمیایی و الکتروشیمیایی و نیز مهندسی مواد گسترش یافته است. انگیزه اصلی برای این منظور یا به عبارت بهتر پشتوانه اساسی گسترش این روش نیازهای خاص دوران جنگ جهانی و انتظارات خاص آن زمان از علم مخصوصاً علوم پایه بوده است. در آن زمان نیاز به باتریهای با حجم کمتر، ذخیره انرژی بیشتر و عمر طولانی تر از یکسو و مواد مقاوم سازه ای و مهندسی برای برآورده ساختن نیازهای صنایع نظامی از سوی دیگر و نیز لزوم انجام تستهای غیر مخرب^۴ روی ادوات و قطعات تولید شده با توجه به اهمیت اساسی پارامتر زمان در دوران جنگ، انگیزه های اصلی توسعه یک روش سریع و مطمئن برای کسب اطلاعات با دقت مناسب راجع به ویژگی های مهندسی و شیمیایی مواد بودند. روش EIS، با توجه به دارا بودن تقریباً تمامی ویژگیهای مورد نظر از یک چنین پروتکلی، در این برحه از زمان بخوبی امتحان خود را پس داد. در دوران بعد از جنگ با ظهور عرصه رقابت و توسعه بسیار سریع جوامع و صنایع و درک هرچه عمیقتر نیاز به کنترل کیفی و کمی و هرچه بهتر محصولات و پارامترهای عملکردی فیزیکی و شیمیایی در صنایع، روش EIS همچنان روز به روز تحت گسترش است و هر روز کاربردهای جدیدی می یابد و یا عملکردهای بالقوه نوینی از آن انتظار می رود. در مورد کاربردهای EIS در الکتروشیمی باید اذعان داشت که اگر چه یک شیمی دان معمولاً (نه همیشه!) از تئوری مدارات AC و جواب ریاضی و معادلات پیچیده و قضایای مربوط در رشته برق-که البته در اغلب موارد برای وی چندان خوش نیستند-اطلاعات عمیق و وافر همانند متخصصان رشته برق ندارد، ولی در عوض بیشتر به دنبال روشهایی است که بتواند از روش EIS برای حل مسائلی که با آن رو دررو است، استفاده کند. ولی این اطمینان را می توان داد که با آگاهی- حتی مختصر- از آنچه که در پس صفحه مانیتور و پشت صفحات نرم افزارهای شبیه سازی و بررسی EIS می گذرد، لذت بررسی یک سیستم الکتروشیمیایی با روش EIS برای یک شیمیدان و حتی فرد غیر متخصص که به نحوی به EIS نیاز پیدا کرده است، صد چندان خواهد شد. کتاب حاضر این هدف اصلی را دنبال می کند.

در ایران روش EIS به نسبت روش تازه ای است و کم کم جای خود را در بین افراد متخصص رشته شیمی مخصوصاً الکتروشیمی (شیمی فیزیک و الکتروشیمی تجزیه ای) باز می کند. با توجه به قابلیت های بسیار مناسب و شایسته روش EIS در بررسیهای الکتروشیمیایی و سازگاری آن با اکثر زمینه های تحقیقاتی روز در جامعه شیمی و علوم مواد در ایران و نبود یک منبع و مرجع جامع به زبان پارسی در این رابطه، بر آن شدیم که به مدد خداوند متعال، مجموعه حاضر را فراهم نموده و در اختیار عزیزان علاقه مند قرار دهیم. کتاب در پنج فصل تنظیم شده است.

¹ Electrochemical Impedance Spectroscopy

² Interdisciplinary

³ J. R. Macdonald

⁴ Nondestructive Tests

در فصل اول راجع به تئوری مدارات AC، که اساس و هسته اصلی EIS را تشکیل می دهد، مطالبی آورده شده است. تا حد امکان سعی شده که در این فصل از مسائل بغرنج ولی دقیق و اثباتهای قوی و برهانهای ریاضی که برای یک شیمیدان عمدتاً کسل کننده است، اجتناب شود و کل موضوع به صورت ساده و مفید عرضه شود.

در فصل دوم ابتدا برای اینکه ذهن خواننده اندکی از نظریه های مدارات AC دور شده و به سمت شیمی سوق پیدا کند، چند روش از روش های الکتروشیمیایی DC برای بررسی های روزمره شیمیایی و الکتروشیمیایی به طور مختصر مرور شده است تا برای درک روش EIS به نسبت به صورت یک پیش زمینه باشد. در این فصل مطالب ذکر شده در فصل اول به سیستمهای شیمیایی و الکتروشیمیایی تعمیم یافته است و به هر یک از عناصر مداری معرفی شده در فصل اول رنگ و بوی فیزیکی و الکتروشیمیایی داده شده است. این فصل از نظرگاه کل کتاب، هسته اصلی درک EIS می باشد. در فصل سوم آرایش وسایل و دستگاه های مورد استفاده در EIS معرفی شده است. همچنین قسمت استحصال و پردازش داده های امیدانس در این قسمت بررسی و مواردی که باید برای رسیدن به یک نتیجه واقعگرا از یک آزمایش EIS مد نظر داشت، بطور جامع بحث شده است.

در فصل چهارم- که قسمت دوم کتاب را تشکیل میدهد به تمامی گفته های نظری سه فصل قبلی جامعه عمل می پوشانیم. در این قسمت کاربردهای عملی روش EIS برای برخی مسائل روتین و تحقیقاتی در زمینه الکتروشیمی مخصوصاً الکتروشیمی سطح آورده شده است. طیف مسائلی که می توان با EIS بررسی نمود و یا با EIS به بررسی آنها کمک کرد، بسیار وسیع است و بدلیل محدودیت در فضای کتاب ناچار شدیم دست به گزینش بزنیم و مواردی را که بیشتر با زمینه های صنعتی و تحقیقاتی جامعه علمی ما در حال حاضر وفاق دارد در ارجحیت قرار دهیم. تعدادی از کارهای ارائه شده در این قسمت، تحقیقات انجام شده در سالهای اخیر توسط مولف و یا با همکاری مولف است که بدلیل به روز بودن و امکان پی گیری بهتر مطالب در اینجا آورده شده اند.

در آخر این فصل با توجه به اینکه در عصر حاضر علم بیشتر به سمت نانو فناوری و سیستمهای زیستی مخصوصاً درک اساس حیات که خود پیچیده ترین پدیده است- پیش می رود، مختصری راجع به کاربردهای فعلی و یا کاربردهای بالقوه روش EIS در آینده، صحبت شده است.

کتاب دارای یک پیوست است که در آن به معرفی نرم افزارهای بررسی و پردازش داده های EIS که توسط مولف و گروه تحقیقاتی وی مورد استفاده قرار گرفته اند، جهت مزید اطلاع خوانندگان پرداخته شده است. این پیوست برای مواردی که اولین بار یک گروه تحقیقاتی و یا فردی در صدد راه اندازی و استفاده از EIS باشد، منابع مفیدی خواهد بود.

در تالیف این کتاب سعی شده است تا انتقال مطالب و مفاهیم به بهترین نحو ممکن انجام گیرد. با این حال اذعان داریم که این اثر خالی از نقص نیست و نظرات و پیشنهادات سازنده ما را در ارائه بهتر این کتاب در چاپ بعدی یاری خواهد نمود. لذا نظرات خود را از طریق نشانی:

تبریز، بلوار ۲۲ بهمن، دانشگاه تبریز، دانشکده شیمی، گروه شیمی فیزیک، آزمایشگاه پژوهشی الکتروشیمی، و یا با پست الکترونیکی mg-hosseini@tabrizu.ac.ir منتقل سازید.

در خاتمه و بیش از همه خود را مدیون خانواده هایمان می دانیم که صبورانه و صمیمانه شرایط را پرداختن به تالیف این کتاب فراهم ساختند.

مولفین: دکتر میرقاسم حسینی (استاد شیمی فیزیک، دانشگاه تبریز)

دکتر ایرج احدزاده (استادیار شیمی فیزیک دانشگاه تبریز)

به نام خدا

پیشگفتار چاپ دوم

حمد و سپاس خداوند مَنان را که توفیق تالیف کتاب حاضر را عنایت فرمود و فرصتی داد تا یافته‌های اندک و ناچیز خود را در طبق اخلاص تقدیم نماییم.

با توجه به استقبال دانشجویان از چاپ اول این کتاب، و پیگیری‌های مستمر آنها و تشویق‌های انجمن خورده‌گی ایران، ما را بر آن داشت که اقدام به چاپ دوم البته با تجدید نظر آن نماییم. با توجه به کاربرد گسترده طیف‌سنجی امیدانس الکتروشیمی در علوم مختلف نظر علوم مواد، شیمی، مهندسی شیمی، پلیمر و خوردگی، استفاده از این تکنیک در تحقیقات بروز این حوزه‌ها سبب شده است تا محققین داخلی نیز نظیر محققان خارجی از این قافله عقب نمانده و بهره کافی از این علم در تحقیقاتشان ببرند. لذا با گذشت مدت کوتاه از چاپ اول آن، ناشر را الزام به چاپ دوم نموده است.

کتاب حاضر با زبان ساده نوشته شده است و برای دانشجویان مبتدی، بدون نیاز به استاد، قابل استفاده و مفید می‌باشد و حاصل تحقیقات و تدریس دوره‌های تخصصی در دانشگاه می‌باشد که با نگاه کاربردی و به دور از پیچیدگی‌های تخصصی جهت استفاده مهندسان و علوم پایه در موضوعات مرتبط با خوردگی، پوشش و الکتروشیمی نگارش شده است.

از همکاران (اساتید و پژوهشگران) و دانشجویان تقاضا داریم که نظرات و انتقادهای سازنده خود را در ارتباط با مطالب این کتاب ارسال نمایند تا در چاپ‌های بعدی مورد استفاده قرار گیرد.

در پایان وظیفه خود می‌دانیم که از زحمات کلیه پرسنل انتشارات انجمن خورده‌گی ایران، بخصوص ریاست محترم انجمن جناب آقای دکتر دهکردی و آقای عباسیان کمال تشکر و قدردانی را داشته باشیم.

همچنین از زحمات دانشجویان تحصیلات تکمیلی بخصوص دوره دکتری ورودی‌های ۹۲ دانشکده شیمی دانشگاه تبریز به خاطر بازخوانی و رفع غلط‌های چاپ اول و نقطه نظرات سودمندشان کمال تشکر را داریم.

به هر حال برای مولفین این استقبال جای بسی خوشحالی داشته و امیدوار هستیم با یاری خدای متعال، این خدمت ناچیز بتواند در توسعه و کاربردی این علوم در حوزه‌های پژوهشی مختلف علوم پایه و مهندسی کشور مثمر ثمر باشد.

دکتر میر قاسم حسینی (استاد تمام شیمی فیزیک دانشگاه تبریز)

ایرج احدزاده (استادیار شیمی فیزیک دانشگاه تبریز)

سخن ناشر

خداوند منان را بسیار سپاسگزاریم که فرصتی حاصل شد تا کتاب "طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی" که حاصل تلاش‌های علمی و تجارب کاربردی اساتید فرزانه دانشگاه تبریز می‌باشد بنا به نیاز مبرم کارشناسان علم خوردگی و تقاضای مکرر دانشجویان عزیز در مقاطع مختلف به ویژه تحصیلات تکمیلی این رشته تجدید چاپ نماییم.

آقای دکتر میرقاسم حسینی استاد معزز دانشکده شیمی - گروه شیمی فیزیک دانشگاه تبریز طی دهه گذشته همکاری تنگاتنگ و سخاوتمندانه‌ای با این انجمن داشته‌اند و مدت‌ها بنیان‌گذار و سردبیر هیات تحریریه مجله علمی پژوهشی "علوم و مهندسی خوردگی" بوده‌اند، هم‌چنین دبیری علمی سیزدهمین کنگره ملی خوردگی را در دانشگاه تبریز به عهده داشته‌اند و در راستای پیشبرد علم خوردگی در کشور و در مجامع بین‌المللی از هیچ کوششی دریغ نکرده‌اند.

فرصتی گران‌بها حاصل شد تا این انتشارات کتاب طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی را که حاصل زحمات و تجربیات اساتید محترم دکتر میرقاسم حسینی و ایرج احدزاده می‌باشد با اصلاحات اعمال شده توسط مولفین محترم برای بار دوم چاپ نماید.

این انجمن ضمن تشکر وافر از مولفین محترم مطالعه این اثر ارزشمند را به دانشجویان عزیز در رشته‌های مختلف مهندسی به ویژه شیمی، خوردگی، شیمی فیزیک و ... توصیه می‌نماید.

با آرزوی فراوان برای پیشبرد علوم مهندسی به ویژه در زمینه دانش خوردگی.

ابراهیم حشمت‌دهکردی

رئیس انجمن خوردگی ایران

پاییز ۱۳۹۶