فصل اول: کلیات و اصول الکتروتراپی

فیزیک الکتریسیته

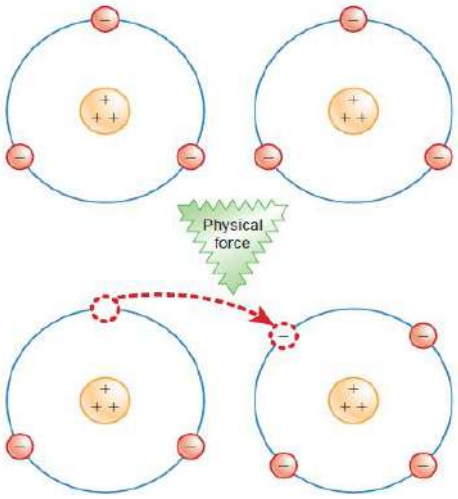
قبل از پرداختن به اثرات، کاربرد ها و استفاده های الکتروتراپی، درک و شناخت کافی از قواعد پایه ای و فیزیک الکتریسیته لازم است.

بار الکتریکی

بار الکتریکی، خصلت پایه ای نیروی الکترومغناطیسی است. مکانیسم ارتباط سلول های زنده با یکدیگر بر پایه ی بار الکتریکی بنا نهاده شده است. واحد اندازه گیری بار الکتریکی، کولن نام دارد. تحت تاثیر نیروهای فیزیکی خارجی مثل اصطکاک، گرما یا منابع شیمیایی یا الکتریکی، اتم های عناصر باردار می شوند. در یک اتم خنثی، تعداد الکترون ها برابر با تعداد پروتون هاست. بنابراین جمع جبری همه بارها (بار خالص) دقیقا برابر صفر است. در تجربه هایی مانند مالش اجسام به یکدیگر، الکترون ها تولید نمی شوند و یا از بین نمی روند، بلکه از جسمی به جسم دیگر منتقل می شوند. اندازه بار منفی الکترون دقیقا برابر با بار مثبت پروتون است. این مقدار را بار بنیادی (با نماد e) می گویند که برابر است با:

$$e = 1.60217653 \times 10^{-19}\ C \approx 1.60 \times 10^{-19}\ C$$

گرچه اتم ها از پروتون های مثبت و الکترون های منفی تشکیل شده اند، اما مفهوم بار (شارژ) به اثر خالص از دست دادن الکترون یا گرفتن الکترون اشاره دارد (شکل ۱- ۱). با انتقال تعدادی الکترون از یک جسم به جسمی دیگر، تعادل بارها در اتم خنثی بر هم می خورد و جسمی که الکترون از دست می دهد، تعداد الکترون هایش از تعداد پرتون های آن کمتر می شود و بار الکتریکی خالص آن مثبت می گردد. همچنین جسمی که الکترون اضافی دریافت می کند الکترون هایش از پروتون های آن فزونی می یابد و بار الکتریکی خالص آن منفی می شود. بار منفی وقتی ایجاد می شود که ماده به طور خالص، الکترون جذب کند؛ در حالیکه با از دست دادن خالص الکترون، ماده بار مثبت پیدا می کند. دقت کنید که ماده با از دست دادن الکترون، بار مثبت پیدا می کند و نه با اضافه شدن پرتون ها.



شکل ۱- ۱: بار الکتریکی با انتقال الکترون ایجاد می شود. اضافه شدن الکترون ها موجب بار خالص منفی و از دست دادن الکترون ها منجر به بار خالص مثبت می شود.

اتم یا مولکولی که الکترون کسب می کند یا از دست می دهد، یون نامیده می شود. پروسه ای که به وسیله آن، یک اتم یا مولکول، بار مثبت یا منفی پیدا می کند یونیزاسیون نامیده می شود. چهار قانون پایه ای بار الکتریکی عبارتند از:

- دو نوع بار الکتریکی وجود دارد: مثبت و منفی
- بارهای همنام یکدیگر را دفع می کنند در حالیکه بار های مخالف، یکدیگر را جذب می کنند
- بار نه خلق می شود و نه از بین می رود
- بار الکتریکی می تواند از یک ماده به دیگری منتقل شود.

قانون کولن

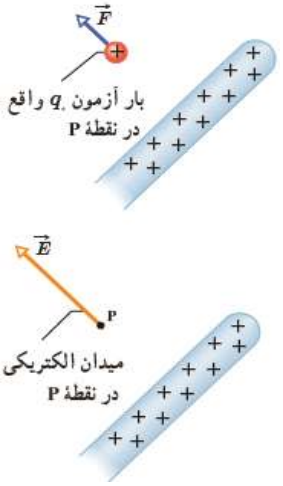
دو جسم بار دار بر هم نیرو وارد می کنند که می تواند جاذبه یا دافعه باشد. اگر بارهای الکتریکی دو جسم همنام باشند این نیرو دافعه است و اگر نا همنام باشند این نیرو جاذبه خواهد بود. اندازه نیروی الکتریکی (الکتروستاتیکی) بین دو بار نقطه ای در راستای خط واصل آنها با حاصل ضرب بزرگی آنها متناسب و با مربع فاصله بین آنها نسبت عکس دارد.

میدان الکتریکی

در قانون کولن گفته شد که دو بار الکتریکی q_1 و q_2 که در فاصله ای از هم قرار دارند بر یکدیگر نیروی الکتریکی اعمال می کنند. سئوال این است که چگونه این دو بار الکتریکی که در تماس با هم نیستند بر یکدیگر نیرو وارد می کنند؟ پاسخ آن است که بار q_1 خاصیتی در فضای پیرامون خود ایجاد می کند که به آن اصطلاحا میدان الکتریکی بار q_1 گفته می شود. وقتی بار q_2 در نقطه ای از فضای پیرامون بار q_1 قرار گیرد تحت تاثیر میدان الکتریکی ای قرار می گیرد که بار q_1 پیش تر در آن نقطه ایجاد کرده است. بنابراین بار q_1 نه با تماس با بار q_2 بلکه به وسیله میدان الکتریکی خود بر بار q_2 نیرو وارد می کند (شکل ۲– ۱).

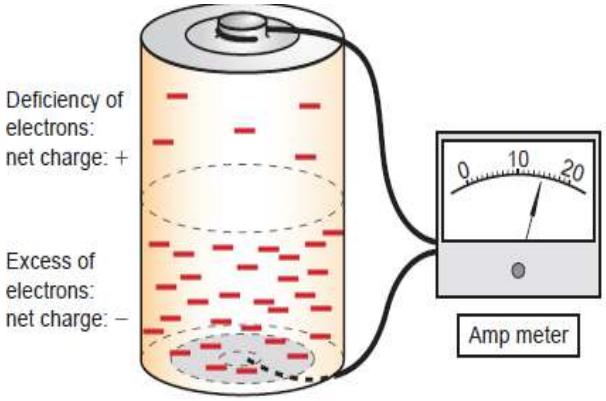
• اندازه میدان حاصل از یک بار الکتریکی با اندازه آن بار نسبت مستقیم و با مربع فاصله از آن نسبت عکس دارد. همچنین جهت بردار میدان الکتریکی $\vec{E}$ در نقطه A، همان جهت نیروی وارد بر بار آزمونی است که به طور فرضی در نقطه A می گذاریم.

• برای تجسم میدان الکتریکی در فضای اطراف اجسام باردار از خط های جهت داری موسوم به خطوط میدان الکتریکی استفاده می کنیم.



شکل ۲–۱: میله باردار میدانی الکتریکی ایجاد می کند و به وسیله این میدان بر بار آزمون نیرو وارد می کند.

بار الکتریکی به وسیله قطبیت (پلاریته) آن بیشتر توصیف می شود. قطبیت به بار خالص یک شی اشاره دارد که می تواند منفی یا مثبت باشد. در یک مدار ساده، مثل مداری که در زمان اتصال الکترود ها به بیمار ایجاد می شود، یک الکترود به عنوان قطب مثبت و الکترود دیگر به عنوان قطب منفی است. قطب یا الکترود دارای بار منفی، کاتد نام دارد و قطب یا الکترود دارای بار مثبت، آند خوانده می شود. یک باتری معمولی خانگی، مثال ساده ای از بار و پلاریته است (شکل ۳– ۱). یک قطب دارای تراکمی از الکترون هاست در حالیکه قطب دیگر کمبود الکترون دارد.



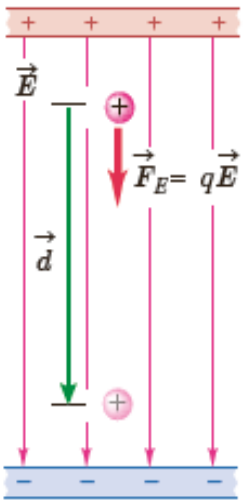
شکل ۳– ۱: یک باتری معمول خانگی. جدا سازی بار الکتریکی، یک شیب غلظتی ایجاد می کند. زمانی که به هم وصل شوند، بین قطب ها جریان برقرار می شود.

انرژی پتانسیل الکتریکی

به صورت کلی می توان انرژی پتانسیل یک جسم را برابر با اختلاف انرژی آن جسم در یک موقعیت نسبت به انرژی آن در مکان مرجع معرفی کرد. در حالت کلی، انرژی پتانسیل، شامل انرژی پتانسیل کشسانی، گرانشی و الکتریکی است. فرض کنید بار مثبت q_1 در جای خود ثابت و بار مثبت q_2 در فضای اطراف آن رها شده است (شکل ۴ – ۱). بار q_2+ بر اثر میدان الکتریکی حاصل از بار q_1+ از آن رانده و دارای انرژی جنبشی می شود. منشاء این انرژی جنبشی از کجاست؟ در واقع این انرژی جنبشی ناشی از تغییر (در اینجا کاهش) انرژی پتانسیلی است که به نیروی الکتریکی بین دو ذره وابسته می باشد. به این نوع از انرژی پتانسیل، انرژی پتانسیل الکتریکی می گوئیم.

شکل ۴ – ۱: ذره باردار q_2+ در میدان الکتریکی فضای اطراف بار q_1+ رها شده است.

فرض کنیم بار الکتریکی q+ را از مجاورت صفحه مثبت یک میدان الکتریکی یکنواخت رها کنیم. بار الکتریکی q+ تحت تاثیر میدان الکتریکی (با چشم پوشی از گرانش) به طرف صفحه منفی شروع به حرکت می کند و به تدریج تندی و انرژی جنبشی آن افزایش می یابد (شکل ۵ – ۱). در این مثال، ذره باردار در جهت نیروی الکتریکی جابجا شده است بنابراین در این جابجایی، کار نیروی الکتریکی، مثبت در نظر گرفته می شود و انرژی پتانسیل الکتریکی ذره باردار کاهش یافته است. به طور کلی **کار نیروی الکتریکی وارد بر یک ذره باردار در میدان الکتریکی در یک جابجایی مشخص برابر با منفی تغییر انرژی پتانسیل الکتریکی در همان جابجایی است.** همان طور که جسم به هنگام حرکت در خلاف جهت نیروی گرانشی، انرژی پتانسیل کسب می کند. ذره باردار نیز هنگام حرکت در جهت خلاف نیروی حاصل از میدان الکتریکی دارای انرژی پتانسیل می شود.



شکل ۵ – ۱: ذره بار دار q+ در میدان الکتریکی یکنواخت رها می شود و به تدریج بر انرژی جنبشی آن افزوده می شود (از نیروی گرانشی چشم پوشی شده است)

پتانسیل الکتریکی

پتانسیل الکتریکی یک کمیّت نرده ای است و عبارتست از مقدار انرژی الکتریکی واحد بار الکتریکی و یکای آن در دستگاه SI، ولت است. معمولا اختلاف پتانسیل الکتریکی بین دو نقطه بیان می شود. بنابر تعریف، اختلاف پتانسیل الکتریکی یک ولت (میان دو نقطه) به این معنی است که که مقدار کار لازم برای انتقال یک کولن بار مثبت از نقطه الف به نقطه ب یک ژول است (اگر پتانسیل یک ولت افزایش یابد). اختلاف پتانسیل الکتریکی بین دو نقطه با رابطه زیر تعیین می شود:

$$\Delta V = V_f - V_i = \frac{\Delta U_E}{q}$$

ΔV: اختلاف پتانسیل الکتریکی بین دو نقطه (ولت)

ΔU_E : تغییر انرژی پتانسیل الکتریکی (ژول)

q: اندازه بار الکتریکی (کولن)

پتانسیل الکتریکی در هر نقطه از میدان از رابطه $V = \frac{UE}{q}$ بدست می آید. پتانسیل در جهت خلاف میدان الکتریکی، افزایش می‌یابد. **ولتاژ**، نیروی رانشی[1] است که الکترون ها را حرکت می دهد. با تصور دو آهن ربا یا جسم بار دار، وقتی که یکی به دیگری نزدیک می شود، نیروی ولتاژ[2] بهتر درک می شود. زمانی که یک آهن ربا یا جسم بار دار بزرگ تر دارای قطبیت یا بار بیشتر به آهن ربا یا جسم بار دار ساکن همنام ولی دارای قطبیت یا بار کمتر نزدیک می شود؛ با کاهش فاصله ی بین آن، میدان نیروی اعمال شده از جسم بزرگ تر بر روی جسم کوچک تر افزایش می یابد. در یک نقطه، نیروی دافعه بر اینرسی جسم کوچک تر غلبه می کند و جسم کوچک تر از جسم بزرگ تر دور می شود. نیروی میدان الکتریکی که باعث حرکت جسم کوچک تر می شود، نیروی ولتاژ نام دارد. همچنین ممکن است ولتاژ تحت عنوان نیروی محرکه الکتریکی[3] یا انرژی پتانسیل الکتریکی[4] خوانده شود. الکتریسیته ی تولید شده به وسیله نیروگاه برق به منازل مایل ها دورتر انتقال داده می شود. این کار به مقدار زیادی کار نیاز دارد. برای انتقال الکتریسیته به مسافت های دور به مقادیر زیادی ولتاژ نیاز است. ولتاژ را می توان نیرویی تصور کرد که بارهای الکتریکی را هل می دهد. با در نظر گرفتن اصل بنیادی بار الکتریکی، زمانی که ذرات بار دار ناهمنام از هم جدا می شوند یا زمانی که ذرات باردار همنام به یکدیگر نزدیک می شوند، ولتاژ لازم می شود.

---

1. Driving force
2. Voltage force
3. Electromotive force
4. Electrical potential energy

در ولتاژ ۵۰۰ ولت یا بیشتر، مقاومت بالای لایه بیرونی پوست می شکند. در نتیجه، مقاومت بدن به عبور جریان تا حد زیادی کاهش یافته و ممکن است مقادیر زیادی از جریان وارد بدن شود، که می تواند منجر به آسیب عمقی به بافت عضلانی، اعصاب و ساختار های دیگر گردد.

جریان الکتریکی

به جریان ذرات باردار، جریان الکتریکی گفته می شود. این ذرات باردار می توانند الکترون ها یا یون ها (مولکول های باردار) باشند. جهت جریان الکتریکی، جهت حرکت بارهای الکتریکی مثبت فرض می‌شود. بنا به تعریف به مقدار بار عبوری در واحد زمان، از مقطع A ، جریان الکتریکی گفته می‌شود. از این رو با فرض این‌که در بازه زمانی t بار q از مقطع مفروض بگذرد، جریان الکتریکی (I) برابر با : $I = \frac{q}{t}$

برای فهم آسان تر رابطه بین شارش جریان[1]، ولتاژ و مقاومت، حرکت آب را با حرکت الکترون ها مقایسه کنید. برای جریان آب، نوعی پمپ باید نیرویی برای ایجاد حرکت تولید کند. به طور مشابه، ولت همان پمپی است که جریان الکترون ها را تولید می کند. مقاومت در برابر جریان آب به طول، قطر و صیقلی بودن لوله آب بستگی دارد. **مقاومت در برابر جریان الکتریکی به خصوصیات هادی بستگی دارد.** مقدار آبی که جاری می شود بر حسب گالن اندازه گیری می شود در حالیکه مقدار الکتریسته ای که جاری می شود بر حسب آمپر بیان می شود. مقداری انرژی که در اثر جریان آب تولید می شود به دو عامل "تعداد گالن های آب که در واحد زمانی جاری می شود" و "فشار ایجاد شده در لوله"بستگی دارد. **انرژی یا توان الکتریکی با حاصل ضرب ولتاژ (یا نیروی محرک الکتریکی) و میزان شارش جریان بدست می آید.**

توان الکتریکی بر حسب وات اندازه گیری و از رابطه زیر بدست می آید : آمپر × ولت = وات

به عبارت دیگر وات به معنی آهنگ مصرف توان الکتریکی است. یک وات عبارتست از: توان الکتریکی مورد نیاز برای تولید شارش جریان ۱ آمپری در فشار ۱ ولت.

[1]. Flow of current

قانون اهم: مقاومت، ظرفیت خازنی و امپدانس

اندازه جریان به طور مستقیم با نیروی ولتاژ و مقدار یا کمیّت بار در حال حرکت بستگی دارد. ندرتا در بافت های بیولوژیک، شارش جریان بدون نوعی مقاومت، اتفاق می افتد. مقاومت[2]، مخالف با شارش جریان[3] است. رابطه بین مقاومت و شارش جریان با قانون اهم بیان می شود: $I = \frac{V}{R}$

در این رابطه I (شدت جریان بر حسب آمپر) با نیروی ولتاژ (V) نسبت مستقیم دارد و با مقاومت (R) نسبت معکوس دارد. واحد استاندارد مقاومت، اهم است. بنا به این قانون، هر چه مقاومت بیشتری در برابر شارش جریان وجود داشته باشد جریان کمتری خواهیم داشت. اگر مقاومت افزایش یابد، برای به حرکت در آوردن همان میزان جریان، به ولتاژ بیشتری نیاز است. هنگام اعمال تحریک الکتریکی برای اهداف درمانی، فهم عوامل موثر بر مقاومت بیولوژیک حائز اهمیت است.

جریان باید از یک الکترود و از طریق ماده واسطه (آب یا ژل) به داخل پوست عبور نموده و وارد بافت های زیرین شود؛ سپس از طریق لایه دیگر پوست و ماده واسطه به الکترود مقابل برسد. مجموع مقاومت در هر بخش از مسیر جریان، مقاومت کل را می سازد؛ زیرا این بخش ها به صورت سری قرار گرفته اند و جریان باید از هر یک عبور نماید. در شرایط معمول درمانی، مقاومت الکترود ها و ماده واسطه و همچنین مقاومت بافت زیر جلدی (که بسیار هیدارته می باشد) پایین است.

اما مقاومت پوست بسیار بیشتر است و این به دلیل مقاومت بالای لایه شاخی می باشد. عروق خونی، عروق لنفاوی و اعصاب به داخل بافت زیر جلدی و درم نفوذ می کنند اما به اپیدرم وارد نمی شوند. **درم و بافت زیر جلدی، مقاومت الکتریکی پائین دارند.** ممکن است چنین تصور شود که بافت زیر جلدی، چون اغلب از بافت چربی تشکیل شده و چربی یک عایق است، مقاوت بالایی دارد؛ اما مقاومت آن کم است زیرا کانال های هدایت کننده (عروق خونی و لنفی) وارد این بافت می شوند.

[2]. Resistance
[3]. Flow of current

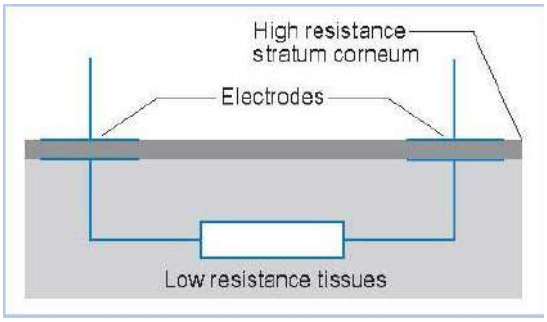
در حالیکه هیچ گونه عروق خونی یا لنفی به اپیدرم نفوذ نمی کنند و اپیدرم یک ساختار فاقد رگ است؛ در واقع سلول های کراتینوسیت از طریق انتشار از مویرگ های موجود در درم زیرین، مواد غذایی شان را دریافت می کنند. لایه شاخی پوست از کراتینوسیت های خشک، مرده و چرکیده تشکیل شده است. کراتینوسیت های مرده، بسته های ریزی از کراتین هستند. این موضوع، هنگام اعمال جریان از عرض پوست اهمیت دارد.

پوست پینه زده یا خیلی خشک مقاومت بالایی نشان می دهد؛ از این رو ممکن است شارش جریان از ناحیه ای مانند پاشنه یا پا تا حد زیادی کاهش یابد. این موضوع می تواند بر روی کاربرد هایی مانند یونتوفورزیس، هنگام تلاش برای عبور دادن یون ها از پوست به بافت های نرم کف پا، تاثیر گذارد.

عمده ی مقاومت بدن در برابر عبور جریان الکتریکی به پوست مربوط می شود. یک دست خشک پینه بسته ممکن است بیش از ۱۰۰۰۰۰ اهم مقاومت داشته باشد (به دلیل لایه خارجی ضخیم سلول های مرده در لایه شاخی). مقاومت بخش درونی بدن حدود ۳۰۰ اهم است و این به وجود بافت های نسبتا نمکی و آب دار زیر پوست مربوط می شود.

مقاومت بدن انسان در برابر جریان الکتریکی ثابت نیست و به عوامل مختلفی از جمله، حالات روحی فرد، سطح تماس و فشار تماس، و ویژگی های جریان الکتریکی بستگی دارد. هر چه سطح و فشار تماس بیشتر باشد مقاومت بدن کمتر می گردد. وقتی که بدن مرطوب و عرق کرده است مقاومت آن تا حد زیادی کم می شود. مقاومتی که بدن انسان در مقابل جریان مستقیم از خود نشان می دهد بسیار بیشتر از جریان متناوب است. هر چه مدت عبور جریان برق از بدن بیشتر باشد مقاومت بدن کمتر می گردد یعنی مقاومتی که بدن در مقابل عبور جریان در لحظات اول از خود نشان می دهد، بسیار بیشتر از گذشت چند لحظه می باشد.

• جایی که دو منطقه کم مقاومت به وسیله یک منطقه با مقاومت بالا (یعنی تقریبا یک عایق) جدا می شوند یک خازن تشکیل می شود و اثرات خازنی بروز می کند. بنابراین جایی که یک الکترود به وسیله پوست (خصوصا لایه شاخی) از عصب و عضله ی واقع در بافت زیرین جدا می شود یک خازن شکل می گیرد (شکل ۶ – ۱). خازن ها در برابر عبور جریان مقاومت نشان می دهند؛ اما میزان این مقاومت به مدت (دیوریشن) پالس بستگی دارد.



شکل ۶ –۱: مسیر های الکتریکی جریان اعمال شده به بافت

امپدانس عبارتست از مجموع مقاومت، ضریب القاء (اندوکتانس)[1] و ظرفیت خازنی[2]. مقاومت، مخالفتی است که یک ماده در برابر عبور جریان نشان می دهد. اندوکتانس، مخالفت ایجاد شده به وسیله جریان های ادی است که در اطراف مواد هدایت کننده جریان شکل می گیرد. اندوکتانس در مبحث الکتروتراپی اهمیت کمتری دارد، اما برای درک چگونگی کارکرد مدالیته دیاترمی مهم است. ظرفیت خازنی عبارتست از توانایی یک ماده برای ذخیره بار الکتریکی.

از بین سه جزء امپدانس، مقاومت بیشترین تاثیر را در اعمال الکتروتراپی دارد. امپدانس پوست در برابر جریان مستقیم (جریان تک جهتی) و طولانی مدت یا جریانی که پالس های آن به آهستگی تغییر می کند، بالاست و بیشتر انرژی الکتریکی در لایه شاخی پراکنده می شود. اما امپدانس خازنی لایه شاخی در برابر دستجات پالسی (Bursts) کوتاه مدت، پایین است و بیشتر انرژی الکتریکی در بافت های زیرین پراکنده می شود.

گاهی اوقات گفته می شود چون پوست در برابر پالس های کوتاه مدت، امپدانس پائینی دارد جریان می تواند به صورت عمقی تر نفوذ کند و تاثیر بیشتری روی ساختار های عمقی تر دارد. اما این درست نیست. امپدانس پایین به این معنی است که جریان بیشتری عبور خواهد نمود اما توجه داشته باشید که جریان در لایه شاخی و بافت های عمقی تر یکسان است و این جریان

[1] . Inductance
[2] . Capacitance

(یا صحیح تر بگوئیم چگالی جریان) است که اثرات بیولوژیک را تعیین می کند. اگر امپدانس بالا باشد می توان ولتاژ محرک را افزایش داد تا جریان بیشتری تولید گردد و تمامی بافت های زیر الکترود ها از جریان بیشتر یکسان بهره مند شوند یعنی بافت های عمقی به شکل انتخابی محروم نخواهند شد.

امپدانس، شکلی از مقاومت در برابر شارش جریان است اما وابسته به فرکانس می باشد. در واقع امپدانس بیانگر نسبت ولتاژ به جریان است زیرا ویژگی های مقاومت و ظرفیت خازن را تلفیق می کند. به شکل ساده باید گفت که مقدار مقاومت در برابر شارش جریان متناوب، امپدانس را معین می سازد؛ اما در برابر جریان مستقیم، تنها مقاومت اهمی (Resistance) وجود دارد. از نظر کلینیکی، ژل ها و عوامل رسانای چسبنده روی الکترود ها باعث کاهش امپدانس و افزایش قابلیت هدایت بین الکترود و پوست می شوند.

ظرفیت خازنی و امپدانس، از ویژگی های شارش جریان بوده و با مقاومت ارتباط دارند. ظرفیت خازنی به این معنی است که یک سیستم متشکل از رسانا و عایق، مانند بدن انسان، به چه میزان می تواند در خود بار الکتریکی را ذخیره نماید. چون جریان نمی تواند آزادانه از عایق عبور کند، پتانسیل الکتریکی دو سوی عایق، انرژی پتانسیل الکتریکی مولکول های عایق را افزایش می دهد. این ذخیره ی انرژی الکتریکی در عایق، بیانگر ظرفیت خازنی (یا برق گنجایی) است. زمانی که شارش جریان متوقف گردد، انرژی ذخیره شده در عایق از طریق رسانا ها آزاد می شود. بیشتر دستگاه های تحریک کننده امروزی، زمانی که استفاده از دستگاه پایان یافت، به طور خطی، شارش جریان را کاهش می دهند. این کاهش تدریجی جریان اجازه می دهد که خازن، بار ذخیره شده را تخلیه کند.

• پوست مانند یک خازن عمل می کند به طوری که اگر ولتاژ سریعا تغییر کند اجازه می دهد که جریان بیشتری عبور کند.

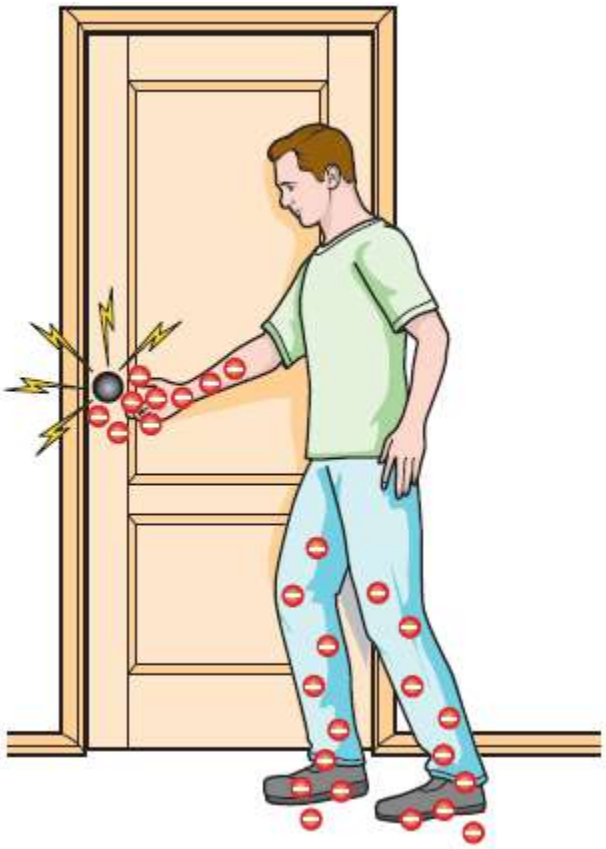
میزان مقاومت خازنی (Xc) از رابطه زیر بدست می آید:

$$Xc = \frac{1}{2\pi f c}$$

C : ظرفیت خازنی بافت برحسب فاراد، f فرکانس برحسب هرتز و عدد π برابر ۳/۱۴ است. طبق این رابطه، هرچه فرکانس بالا تر باشد میزان مقاومت خازنی کمتر خواهد بود .

شوک استاتیک

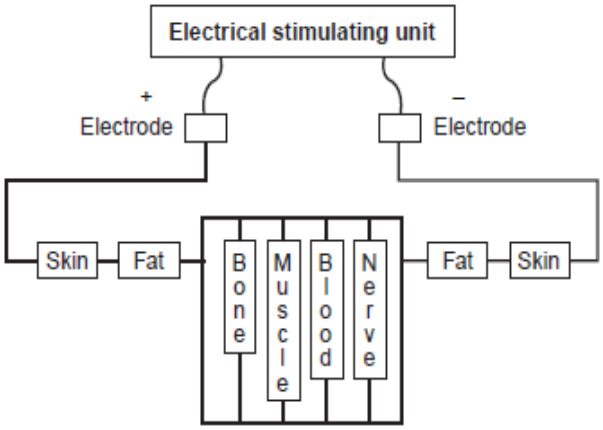
تحت تاثیر نیروهای خارجی مانند گرما، اصطکاک، نیروهای شیمیایی، الکتریکی یا دیگر نیروهای فیزیکی، ممکن است تعداد الکترون های یک ماده تغییر کند. با مالش پاهای تان به فرش، در اثر اصطکاک، الکترون ها از زمین به بدنتان منتقل می شوند. این الکترون ها موقتا در بدنتان ذخیره می شوند که به عنوان یک خازن عمل می کند. زمانی که شما یک شی فلزی را لمس کنید، آن شی به عنوان یک هادی عمل می کند و یک مدار ایجاد می شود و الکترون های ذخیره شده آزادانه از بدنتان به شی فلزی جاری می شود (شکل ۷ – ۱). اثر فیزیکی این پدیده، شوک است.



شکل ۷ – ۱: الکترون ها منتقل شده و باعث انباشت بار الکتریکی می شوند و زمانی که مدار کامل گردد جریان می یابد.

مدار های الکتریکی

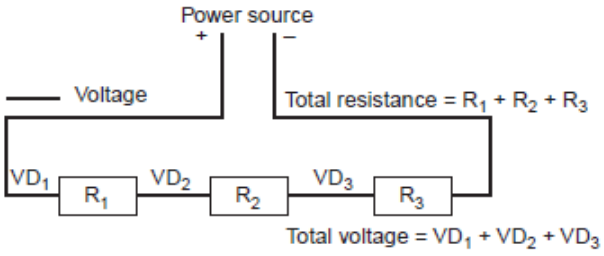
دستگاه های تحریک الکتریکی از ترکیبی از مدار های سری و موازی استفاده می کنند. برای مثال برای تحریک انقباض عضله، الکترود ها بر روی پوست قرار داده می شوند (شکل ۸ – ۱). جریان باید از این الکترود ها به طور مستقیم از پوست و چربی عبور نماید.



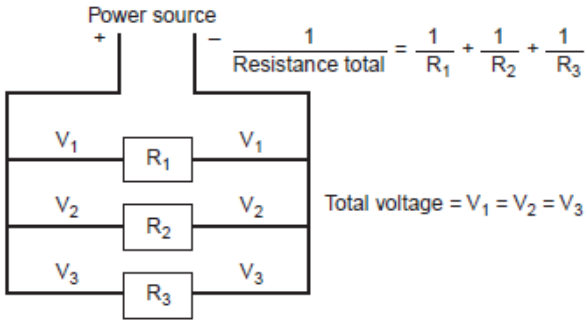
شکل ۸ – ۱: مدار الکتریکی موجود در زمانی که الکترون ها از بافت های بدن عبور می کنند در واقع ترکیبی از مدار سری و موازی است

مقاومت کل در برابر عبور جریان برابر با مقاومت های مواجه شده در هر الکترود خواهد بود. عبور جریان از پوست، اساس یک مدار سری است. پس از آن که جریان از پوست و چربی عبور نمود در تماس با انواعی از بافت های بیولوژیک مختلف قرار می گیرد (استخوان، بافت همبند، خون، عضله). جریان چند مسیر مختلف در پیش دارد که با گذر از آنها می تواند به عضله مورد نظر برسد. جریان کل عبوری از این بافت ها برابر با مجموع جریان در هر یک از انواع بافت هاست؛ و چون بافت های دیگری وجود دارند که ممکن است جریان از طریق آنها عبور کند، مقاومت کل به طور موثری کاهش می یابد. به این ترتیب در این کاربرد درمانی، از هر دو مدار موازی و سری برای تولید پاسخ فیزیولوژیک مورد نظر استفاده شده است.

یاد آوری: اجزاء مدار الکتریکی می‌توانند به روش‌های مختلفی به هم وصل شوند. ساده‌ترین آن‌ها اتصالات سری و موازی هستند. در اتصال سری، قطعات پشت سر هم قرار داده می‌شوند به‌گونه‌ای که جریان عبوری از همه آنها یکسان خواهد بود. در اتصال موازی، ولتاژ اعمال شده به همه اجزای سازنده یکسان خواهد بود. در مدار سری، جریان همه اجزا یکسان است و مجموع ولتاژهای روی هر جزء با ولتاژ اعمال شده بر کل مدار برابر است. در مقابل در مدار موازی، ولتاژ دو سر همه اجزاء یکسان است و جریان کل مدار برابر مجموع جریان هر یک از اجزای مدار خواهد بود (شکل های ۹– ۱ و ۱۰ – ۱)



شکل ۹– ۱: مدار سری



شکل ۱۰ – ۱: مدار موازی

حد فاصل الکترود – پوست

برای عبور جریان از الکترود به بافت ها (به طور طبیعی پوست)، به لایه ای از مایع حاوی یون نیاز است که همان آب یا ژل هدایت کننده می باشد. عموما ژل مورد استفاده برای این منظور عمدتا بر پایه ی آب، نمک های یونی (NaCl or KCl)، یک عامل سورفکتانت، ضد قارچ و ضد باکتری است. ژل یا آب یک مسیر هدایتی یکنواخت بین الکترود و اپیدرم ایجاد می کند زیرا منافذ و بی نظمی های زیر الکترود را پر می کند. والا زمانی که سطح اپیدرم بسیار نامنظم باشد احتمالا الکترود فقط در چند نقطه با پوست تماس داشته و در نتیجه چگالی جریان در این نقاط بالا خواهد بود. به علاوه سطح اپیدرم مقاومت الکتریکی بالایی دارد زیرا تا حد زیادی از کراتین خشک تشکیل شده و نیز به دلیل وجود چربی پوست می باشد. **با مرطوب سازی سطح پوست و نیز تماس الکترود و ژل با پوست، از این مقاومت کاسته می شود.** آب موجود در ژل به تدریج از پوست انتشار یافته و قابلیت هدایت آن را افزایش می دهد. گاهی اوقات تراپیست ها، با استفاده از یک کیسه گرم یا لامپ مادون قرمز پیش از اقدام به درمان، پوست را گرم می کنند. **این کار با هدف افزایش موضعی تعریق و در نتیجه افزایش قابلیت هدایت پوست انجام می شود.**

زمانی که پوست هموار نیست، مثلا وقتی میخچه های بزرگ یا اسکار وجود دارد، باید احتیاطات و مراقبت لازم لحاظ شود؛ چرا که اعمال جریان می تواند موجب توزیع غیر یکنواخت جریان از پوست و تطابق نامناسب الکترود با پوست گردد. همانند دیگر موانع موثر در برابر عبور جریان از پوست، این عامل نیز می تواند منجر به شارش جریان بالا در برخی نواحی شده و ممکن است خطر آسیب پوست را افزایش دهد. قبل از قرار دهی الکترود ها و اعمال جریان، باید سلامتی پوست زیر الکترود ها مورد بررسی قرار گیرد. اگر پوست جراحت یا پارگی داشته باشد جریان به طور انتخابی از این ناحیه وارد می شود زیرا مقاومت در آن نقطه بسیار کمتر است. این مسئله می تواند در شدت جریان مورد استفاده در کلینیک، منجر به نارحتی قابل توجه بیمار گردد.

یک استثناء به هنگام درمان زخم وجود دارد؛ تفاوت این نوع درمان، در شدت جریان است که بسیار کمتر از سایر موارد کاربرد می باشد. اگر پوست، آسیب کوچکی داشته باشد می توان به درمان ادامه داد منتهی باید به وسیله یک مانع نارسانا (مثل یک زخم بند ضد آب یا کتان یا گاز با پوشش ژلی نفتی) ناحیه آسیب پوستی را پوشاند. استفاده از این نوع مانع فقط وقتی موجّه است که درمان می بایست ادامه یابد و هیچ گونه افزایش خطر عفونت یا آسیب پوست وجود نداشته باشد. چاره دیگر استفاده از یک محل الکترود متفاوت است؛ این کار گاها مقدور است (مثلا وقتی هدف تحریک حسی باشد) اما همیشه امکان پذیر نیست (مثلا وقتی بخواهیم عضله خاص را تحریک کنیم).

بنابراین از به کار بردن تحریک الکتریکی بر روی شکاف و جراحت پوست باید اجتناب نمود مگر این که از روش و نوع جریان مناسب، مثلا برای التیام زخم، استفاده شود. دلیل این موضوع دو چیز است: (۱) چون پوست دچار آسیب شده، امپدانس پوست کاهش می یابد. نواحی آسیب دیده نسبت به نواحی اطراف، امپدانس الکتریکی کمتری دارند در نتیجه چگالی جریان در نواحی آسیب دیده بالاتر خواهد بود. جریان بیشتر منجر به آسیب بافتی بیشتر می گردد. (۲) نواحی دچار آسیب سطحی، حساسیت بیشتری دارند و در نتیجه گیرنده های درد راحت تر به وسیله جریان عبوری تحریک می شوند. بنابراین **ترکیب دو عامل "حساسیت زیاد" و "بالاتر بودن چگالی جریان تحریکی" منجر به اثرات مضر خواهند شد.**

خطر آسیب هنگام استفاده از جریان متناوب، در مقایسه با جریان پالسی، به طور مشخص افزایش می یابد و این به دلیل چرخه کار پالس است. برای مثال اگر جریان اینترفرنشیال واقعی با شدت جریان ۴۰ میلی آمپر برای تولید پاسخ حرکتی قوی اعمال شود ولتاژ محرک حدود ۴۰ ولت خواهد بود و توان برقرار شده در بافت ۱/۶ وات خواهد بود (P = VI). چون چرخه کار ۱۰۰٪ است توان متوسط ۱/۶ وات خواهد بود و اگر جریان بر روی یک ناحیه کوچک متمرکز شود، ممکن است چگالی توان، ایجاد خطر نماید. اما اگر از جریان پالسی با دیوریشن ۲۰۰ میکروثانیه و فرکانس ۵۰ هرتز استفاده شود ولتاژ حداکثر برای ایجاد همان پاسخ حدود ۶۰ ولت و حداکثر جریان حدود ۶۰ میلی آمپر خواهد بود در نتیجه توان حداکثر ۳/۶ وات می شود؛ ولی چون چرخه کار فقط ۱٪ است توان متوسط ۳۶ میلی وات یا حدود $\frac{1}{40}$ توان جریان متناوب پیوسته خواهد بود. اگر پوست سالم باشد نواحی قرار گیری الکترود ها را باید با تمیز کننده الکلی یا آب و صابون تمیز نمود و سپس به دقت خشک نمود به طوری که پوست نمناک یا مرطوب باشد اما خیس نباشد. این کار عمدتا با هدف زدودن مواد سطحی مانند روغن از سطح پوست می باشد که ممکن است مقاومت پوست را افزایش دهند.

دستگاه های جریان الکتریکی، شکل موج ها و پارامتر ها

تحریک کننده ها (استیمولاتور ها) یا از برق شهر یا باتری تغذیه می شوند. انتخاب تحریک کننده به نوع جریان و تعداد انتخاب مورد نیاز بستگی دارد. استیمولاتورهای الکتریکی پرتابل کوچک، حدودا به اندازه یک دوربین کوچک، معمولا به وسیله یک باتری ۹ ولتی تغذیه می شوند. استیمولاتورهای کلینیکی بزرگ تر، معمولا باید به پریز برق (متناوب ۱۱۰ ولت) وصل شوند؛ گرچه برخی از آنها باتری قابل شارژ دارند و به آنها اجازه می دهد، وقتی که به پریز برق وصل نیستند، برای چند ساعتی کار کنند. سیم های الکترود، دستگاه استیمولاتور را به الکترود ها وصل می کنند که بر روی پوست بیمار قرار داده می شوند. جریان الکتریکی بین این الکترود ها، از طریق پوست بیمار و بافت های زیرین، برقرار می گردد. گاها ترمینولوژی مورد استفاده برای توصیف پارامتر های جریان الکتریکی ممکن است گیج کننده باشد، شاید به این دلیل که این پارامترها، واژه های

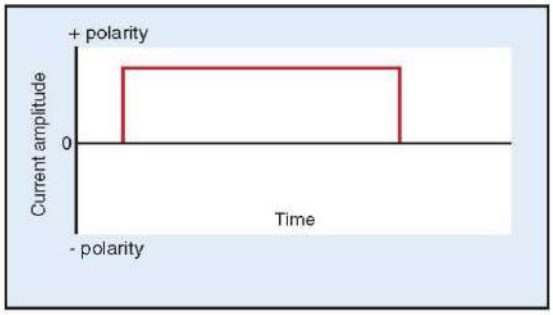
مترادفی اند که برای توصیف یک ویژگی استفاده می شوند. برای مثال، "نرخ"[1] و "فرکانس"[2] برای توصیف تعداد پالس های جریان الکتریکی در یک ثانیه استفاده می شوند.

شکل موج ها

شکل موج[3] جریان، نمایش گرافیکی جریان الکتریکی در طول زمان می باشد. محور عمودی بیانگر جهت جریان (مثبت یا منفی) و محور افقی نشان دهنده زمان است. از نظر شکل موج، جریان الکتریکی به سه نوع جریان مستقیم (DC)[4]، جریان متناوب (AC)[5] و جریان پالسی (PC)[6] تقسیم می شود.

جریان مستقیم

به جریان مداوم ذرات باردار در یک جهت، حداقل به مدت یک ثانیه، جریان مستقیم گفته می شود (شکل ۱۱ – ۱). جریانی که از یک باتری، خارج می شود جریان مستقیم است؛ گرچه بیشتر دستگاه های تحریک الکتریکی که با باتری کار می کنند این نوع جریان را تولید نمی کنند. بنا به قرار داد، انحراف از خط پایه ی ایزوالکتریک به سمت بالا به شارش جریان در جهت مثبت اشاره دارد و برعکس، انحراف به سمت پایین به منزله شارش در جهت منفی است (این تخصیص در مورد الکترومیوگرافی، معکوس می شود). انواعی از جریان مستقیم وجود دارند اما برای آن که به درستی DC نامیده شوند باید تک جهتی بوده و برای یک دوره زمانی بدون انقطاع باشند.

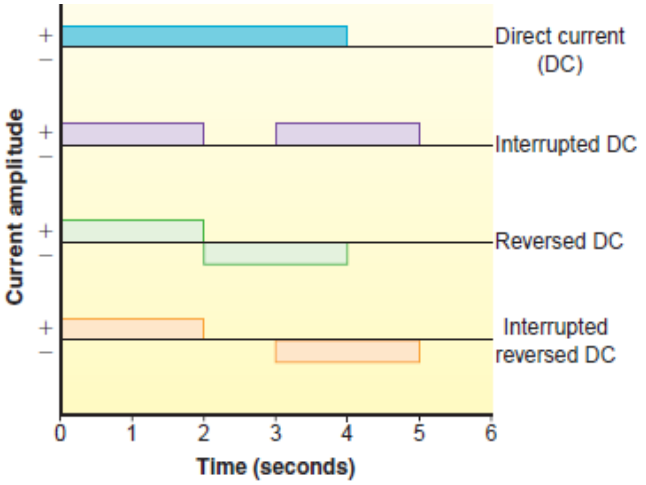


شکل ۱۱ – ۱: جریان مستقیم

از اشکال دیگر جریان مستقیم عبارتند از (شکل ۱۲ – ۱):

- **جریان مستقیم منقطع (Interrupted DC):** جریان پس از ۱ ثانیه متوقف می شود، سپس (بعد از وقفه ای) مجددا حداقل به مدت ۱ ثانیه در همان جهت برقرار می گردد.
- **جریان مستقیم معکوس**[7]: جریان پس از یک ثانیه متوقف و مجددا حداقل به مدت ۱ ثانیه در جهت مخالف برقرار می شود.
- **جریان مستقیم منقطع معکوس**[8]: ترکیبی از دو جریان بالاست.

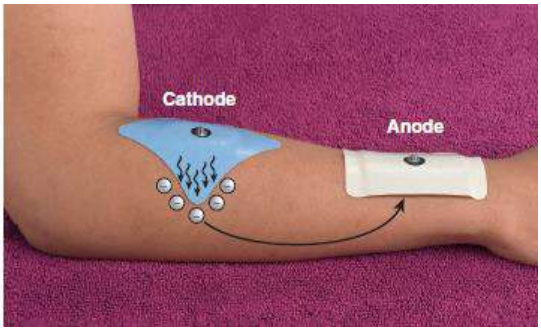
وقتی از جریان DC استفاده می کنیم یک الکترود، آند (مثبت) و دیگری کاتد (منفی) خواهد بود. اگر جهت جریان عوض شود، مثلا در جریان مستقیم معکوس، قطبیت الکترود ها نیز عوض می شود.



شکل ۱۲ – ۱: جریان مستقیم (DC) شکل های مختلفی دارد، جریان مستقیم مرسوم (شکل بالایی)، بیشتر استفاده می شود.

جریان مستقیم عموما برای الکتروتراپی به کار نمی رود زیرا معمولا برای بیمار ناراحت کننده است. از جریان مستقیم کم شدت برای یونتوفورزیس و تحریک انقباض عضلات بدون عصب استفاده می شود زیرا عموما انواع دیگر جریان ها برای این کاربرد ها موثر نیستند. رایج ترین کاربرد کلینیکی جریان مستقیم، یونتوفورزیس و ترمیم زخم است (شکل ۱۳ – ۱).

1. Rate
2. Frequency
3. Waveform
4. Direct Current; DC
5. Alternative Current; AC
6. Pulsed Current; PC
7. Reversed DC
8. Interrupted reversed DC



شکل ۱۳ – ۱: در یونتوفورزیس از جریان مستقیم برای جابجا کردن یون ها استفاده می شود. یون های دارای بار منفی در زیر کاتد به داخل بافت رانده می شوند.

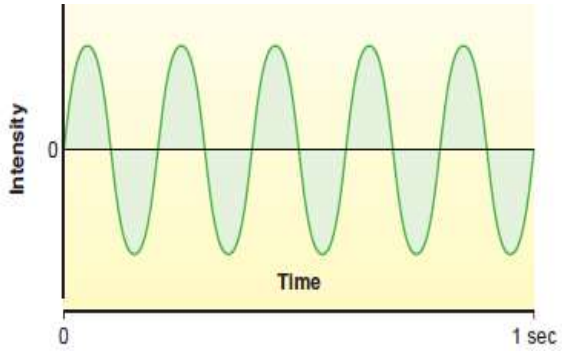
در پاسخ فیزیولوژیک به این نوع جریان، یون های مثبت و منفی به طرف الکترود های با قطب مخالف جذب می شوند؛ در نتیجه انباشتگی یون های باردار در زیر الکترود ها اتفاق می افتد که محیط را اسیدی یا بازی می کند و ممکن است ارزش درمانی داشته باشد. این تکنیک درمانی تحت عنوان **گالوانیزم طبی**[1] شناخته می شود. اگر آمپلیتود جریان مستقیم اعمال شده برای تولید انقباض عضله به اندازه کافی زیاد باشد فقط زمانی که شارش جریان وصل و قطع می گردد انقباض اتفاق می افتد. بنابراین در مورد جریان مستقیم پیوسته، زمانی که جریان روشن و و خاموش می گردد انقباض عضله اتفاق می افتد.

از نقطه نظر تحریک عصب، جریان مستقیم را می توان به عنوان یک پالس با زمان بسیار طولانی (نامحدود) تصور کرد. به طور کلی وقتی دیوریشن پالس از حدود ۱۰۰ میلی ثانیه فراتر رود مدت زمان پالس دیگر بی اهمیت خواهد بود (به منحنی شدت – مدت در شکل ۵۴ – ۱ دقت کنید). بنابراین یک پالس ۵۰۰ میلی ثانیه ای همان اثر را دارد که یک پالس ۵ یا ۵۰ ثانیه ای دارد. در واقع صرف نظر از دیوریشن پالس بیش از ۱۰۰ میلی ثانیه، آستانه تحریک در شدت تحریکی یکسان اتفاق می افتد که همان رئوباز است. مهم تر این که در صورت استفاده از شدتی بیش از شدت آستانه، عصب یک بار تحریک می گردد و سپس شروع به تطابق می نماید و بلافاصله یا سریعا فعالیت یا فایرینگ عصب متوقف می شود.

[1] . Medicall galvanism

جریان متناوب

برخلاف جریان مستقیم، جریان متناوب، یک جریان دو جهتی و بدون انقطاع یون ها یا الکترون هاست و باید حداقل یک بار در ثانیه جهت آن عوض شود (شکل ۱۴ – ۱). جریانی که از پریز برق خارج می شود یک جریان متناوب است؛ البته ضرورتا جریانی که از دستگاه های تحریک الکتریکی متصل به پریز برق خارج می شود، جریان متناوب نیست. جریان متناوب مورد استفاده کلینیکی دارای فرکانس از ۱ kHz تا ۱۰ kHz است که اصطلاحا فرکانس متوسط خوانده می شود. این بدان معنی است که مدت زمان یک سیکل کامل جریان متناوب بین ۱ میلی ثانیه (در جریان ۱ kHz) و ۱۰۰ میکروثانیه (در جریان ۱۰ kHz) است. چون هر سیکل کامل شامل دو فاز است (یکی مثبت و دیگری منفی)، مدت زمان هر فاز در دامنه ۵۰ میکروثانیه تا ۵۰۰ میکروثانیه است. **شارش جریان، متوازن (متعادل) بوده و مقدار بار الکتریکی در هر فاز یکسان است.**



شکل ۱۴– ۱: جریان متناوب با شکل موج سینوسی

به طور طبیعی از فرکانس بالای ۱۰ kHz استفاده نمی شود زیرا فیبر عصبی در فرکانس های بالاتر جریان متناوب، تحریک پذیری کمتری نشان می دهند؛ در واقع نوسانان ها به قدری سریع اند که فیبر عصبی نمی تواند به آنها پاسخ بدهد. در فرکانس ۱۰۰ kHz، شدت لازم برای دپلاریزه کردن عصب منجر به سوختگی بافت زیر الکترود ها خواهد شد. **در جریان متناوب، با افزایش فرکانس، دیوریشن سیکل ها کاهش می یابد و با کاهش فرکانس، دیوریشن سیکل افزایش می یابد** (شکل ۱۵ – ۱). به دیوریشن یک سیکل جریان متناوب، طول موج نیز گفته می شود که مشابه به دیوریشن پالس جریان پالسی است (شکل ۱۶ – ۱).