

## طراحی سیستم چندالکترودی هوشمند برنامه پذیر برای استفاده در عملیات داده برداری در مطالعات ژئوالکتریک

### مقدمه:

علم ژئوفیزیک از زیر شاخه های علوم زمین می باشد. این علم بر پایه تجزیه و تحلیل خواص فیزیکی زمین استوار است. ژئوفیزیک علمی بسیار گسترده و دارای شاخه های متعددی می باشد. یکی از این روش ها، روش مقاومت سنجی الکتریکی و قطبش القایی می باشد. این روش کاربرد وسیع و گسترده ای در مطالعات اکتشاف معادن و ساختارهای زمین شناسی، ژئوفیزیک مهندسی و مطالعات محیطی، اکتشاف آب و باستان شناسی دارد. با توجه به این موارد، سیستم الکترودهای هوشمند برنامه پذیر می تواند امکان اجرای چندین آرایش الکترودی متفاوت جهت افزایش دقت جانبی و عمقی را فراهم نموده و زمان اجرای این عملیات داده برداری را به حداقل کاهش دهد. امری که بدون داشتن یک همچنین سیستمی تقریباً غیرممکن و فاقد صرفه اقتصادی (با توجه به هزینه های بالای عملیات داده برداری) خواهد بود.

در حال حاضر سیستم های چند الکترودی متفاوتی که در ایران طراحی و مورد استفاده قرار گرفته اند فقط قادر به اجرای آرایه های دوقطبی-دوقطبی و قطبی-دوقطبی و قطبی-قطبی بوده و امکان سویچ کردن و کنترل الکترودهای جریان در این سیستم ها وجود ندارد. در صورتی که سیستم کنونی امکان کنترل تمامی الکترودهای پتانسیل و جریان را داشته و با توجه به این مزیت، می توان کلیه آرایش های الکترودی را بر روی زمین طراحی و اجرا نمود.

این سیستم، شامل چندین الکتروود هوشمند است که بر روی یک کابل چند رشته ای (Multi conductor) قرار گرفته است. این الکترودهای هوشمند قادر خواهند بود که سیگنال دستوری (Command Signal) را از کنترل کننده دریافت و الکتروود مشخصی را به رشته ی معین و انتخاب شده ای در کابل متصل نمایند.

تمامی الکترودهای هوشمند در تمامی مشخصه‌ها با یکدیگر یکسانند و از برنامه‌نویسی یکسانی نیز بهره می‌گیرند که این خود باعث سادگی در ساختار کابل مورد استفاده و سهولت در امر جایگزینی الکترودهای هوشمند می‌گردد. در واقع در یک چنین سیستمی، در عوض استفاده از یک کد آدرس‌دهی مجزا و متفاوت به هر مدار سویچ‌کننده در یک سری خروجی مشخص بر روی کابل چندرشته، هر سویچ‌کننده الکترونیکی با یک کد آدرس‌دهی یکسان برنامه‌ریزی شده‌است. در این سیستم در صورت خرابی هر یک از الکترودهای هوشمند، می‌توان به راحتی آن را با یک اکتروود هوشمند زاپاس جایگزین نمود که یکی از مهمترین مزیت‌های این سیستم چند الکترودی هوشمند است.

در این بخش ابتدا کلیاتی در مورد روش‌های الکتريکی شامل روش قطبش‌پذیری القایی و مقاومت سنجی الکتريکی و آرایه‌های متداول ارائه می‌گردد.

### روش مقاومت سنجی الکتريکی (Resistivity-RS)

در روش مقاومت سنجی الکتريکی، جریان‌های الکتريکی مصنوعی توسط دو الکتروود به زمین تزریق می‌شود و اختلاف پتانسیل منتجه بین دو نقطه در سطح زمین اندازه‌گیری می‌شود. انحراف از شکل اختلاف پتانسیل‌های قابل انتظار در مورد زون‌های همگن اطلاعاتی در مورد شکل و خواص الکتريکی ناهمگونی‌های زیرسطحی ارائه می‌دهد.

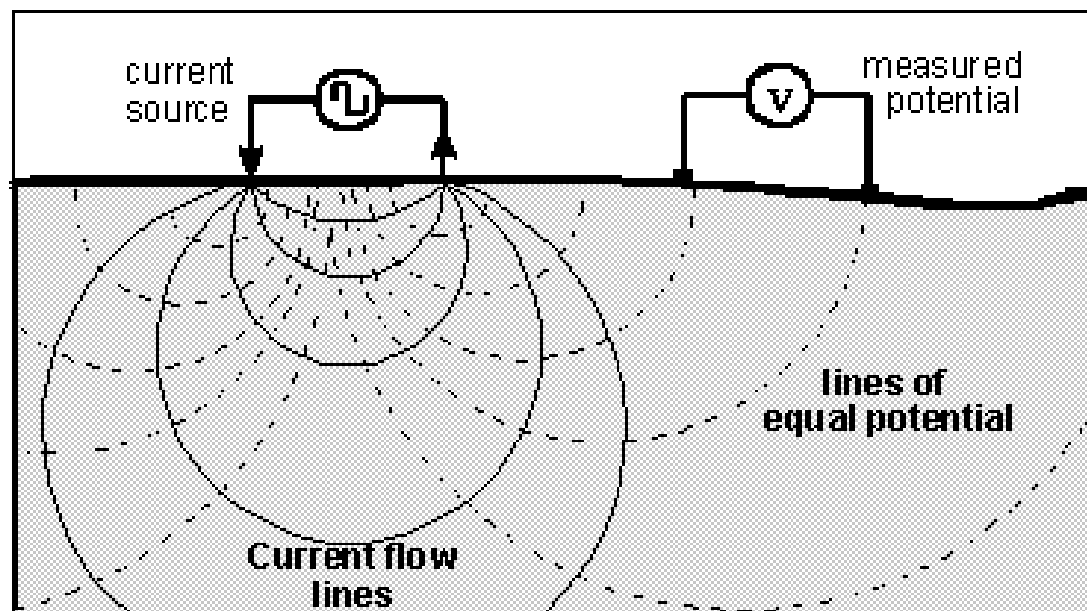
مقاومت ویژه یک ماده به عنوان مقاومت ویژه بین سطوح مخالف یک مکعب واحد از جسم بر حسب اهم متر تعریف می‌شود. مقاومت ویژه الکتريکی یکی از خواص فیزیکی سنگ‌ها می‌باشد که دارای تغییرات زیادی است. کانی‌های خاصی مانند فلزات طبیعی و گرافیت از طریق عبور الکترون‌ها جریان الکتريکی را هدایت می‌کنند لیکن بیشتر کانی‌های تشکیل‌دهنده سنگ‌ها غیرقابل نفوذ بوده و جریان الکتريکی اغلب از طریق یون‌های آب موجود در خلل و فرج سنگ انتقال می‌یابد. بنابراین بیشتر سنگ‌ها الکتريسته را بطریق الکترولیتی هدایت می‌کنند تا از طریق الکترونیکی، و این بدان معناست که تداخل عمده‌ترین کنترل‌کننده مقاومت سنگ بوده و علاوه بر آن میزان آب درون خلل و فرج و مقاومت الکتريکی آب نیز در این جهت نقش اصلی را بازی می‌کنند و در حد وسیعی مقاومت ویژه الکتريکی سنگ را تغییر می‌دهند و بر این اساس هم‌پوشی قابل ملاحظه‌ای بین مقاومت ویژه الکتريکی انواع مختلف سنگ‌ها وجود

دارد و در نتیجه مشخص کردن نوع سنگ‌ها تنها بر اساس داده‌های مقاومت‌سنجی امکانپذیر نمی‌باشد و حتماً باید عوامل فوق را مدنظر قرار داد. در اندازه‌گیری مقاومت ویژه الکتریکی، جریان الکتریکی از نوع مستقیم توسط دو الکترود جریان  $(A, B)$  به درون زمین فرستاده می‌شود و اختلاف پتانسیل حاصل بین دو الکترود پتانسیل  $(M, N)$  در زمین اندازه‌گیری می‌شود. مقاومت ویژه الکتریکی از فرمول  $P = K.V / I$  محاسبه می‌گردد که در این فرمول  $V$  اختلاف پتانسیل اندازه‌گیری شده و  $I$  شدت جریان تزریق شده به زمین و  $K$  ضریب ژئومتری آرایش مورد استفاده بوده و اگرچه برای هر آرایش می‌توان فرمول آن را بیان کرد ولی فرمول کلی محاسبه این ضریب بصورت زیر می‌باشد.

$$K = 2\pi \cdot \frac{1}{\frac{1}{AM} - \frac{1}{AN} - \frac{1}{BM} + \frac{1}{BN}}$$

وقتی جنس زمین همگن (یکنواخت) باشد مقاومت ویژه الکتریکی محاسبه شده بر اساس این معادله ثابت بوده و مستقل از فاصله الکترودها خواهد بود ولی اگر ناهمگنی زیرسطحی، موجود باشد؛ مقاومت ویژه الکتریکی با موقعیت نسبی الکترودها تغییر می‌کند و هر مقدار محاسبه شده به عنوان مقاومت ویژه الکتریکی ظاهری ( $a$ ) نامیده خواهد شد و تابعی از شکل ناهمگنی مربوطه خواهد بود.

شکل ۱ نمایی شماتیک از جفت الکترود جریان که یک سیگنال مربعی را به درون زمین ارسال می‌کند و جفت الکترود پتانسیل را نمایش می‌دهد.



شکل ۱

### روش قطبش پذیری الکتریکی (Induced Polarization-IP)

اول بار در اواخر دهه ۱۹۴۰ روش قطبش یا پلاریزاسیون القایی برای اکتشاف توده‌های کانسنگی بالاخص برای سولفیدهای پراکنده (دیسیمینه) مورد استفاده قرار گرفت. در دهه ۱۹۶۰ از این روش بطور گسترده در اکتشافات ژئوفیزیک معدنی زمین پایه استفاده شده است. «کنراد شلامبرگر» احتمالاً اولین فردی بود که وجود پدیده پلاریزاسیون القایی را گزارش کرد.

تجارب آزمایشگاهی نشان داده است هنگامی که جریان الکتریکی از نوع مستقیم (DC) و یا متناوب (AC) با فرکانس خیلی کم حدود ۰/۱ هرتز به زمین فرستاده شود، انرژی الکتریکی در داخل سنگ‌ها بر اساس فرآیندهای الکتروشیمیایی ذخیره می‌شود. این عمل معمولاً به دو طریق صورت می‌گیرد.

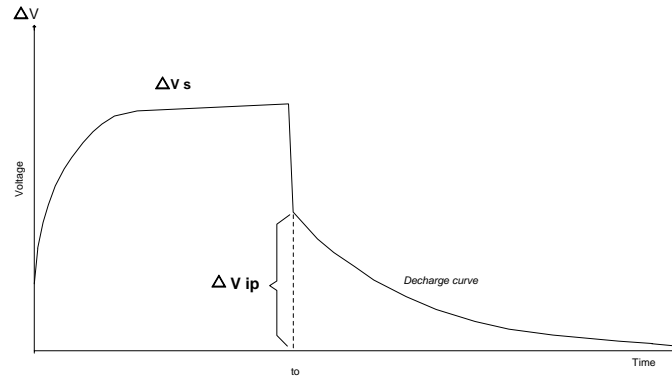
پلاریزاسیون غشائی یا غیر فلزی

پلاریزاسیون الکترودی یا فلزی

در روش پلاریزاسیون غشائی یا غیر فلزی عبور جریان الکتریکی توسط الکترولیت‌های موجود در خلل و فرج سنگ‌ها صورت می‌گیرد. این نوع IP بیش‌تر در زمین‌های رسی دیده می‌شود و بدین جهت در مورد اکتشاف آب و نواحی رسی این روش نیز می‌تواند کمک شایانی انجام دهد. علت این نوع IP را می‌توان چنین توجیه کرد که سطح کانی‌های رسی دارای بار منفی است و در نتیجه بارهای مثبت را جذب می‌کند.

لذا بعد از گسترش جریان بارهای مثبت جابجا می‌شوند و پس از قطع جریان به وضع اولیه خود بر می‌گردند که نتیجه این عمل پدیده IP می‌باشد (شکل ۲).








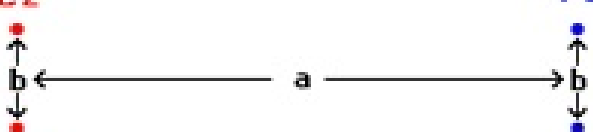
در روش عبور پلاریزاسیون الکترودی یا فلزی جریان الکتریکی توسط کانی‌های فلزی در سنگ‌ها بصورت الکترونیکی صورت می‌گیرد. البته در این حالت ممکن است همزمان عبور جریان الکتریکی توسط الکترولیت‌های موجود در خلل و فرج آنها نیز صورت پذیرد. هرگاه جریان الکتریکی فرستاده به داخل زمین بطور ناگهانی قطع شود. یون‌ها به آهستگی پراکنده شده و بسوی تعادل پیش می‌رود که سبب پیدایش ولتاژ ضعیف و رو به زوال IP می‌شود. طول مدت دوام ولتاژ رو به زوال IP در داخل زمین به عواملی مثل جنس و ساخت سنگ‌ها، تخلخل، نفوذپذیری، قابلیت هدایت الکتریکی، کانی‌های فلزی و قابلیت هدایت الکترولیت موجود در حفرات سنگ‌ها بستگی دارد. هر چه ماده معدنی هادی تر و درصد آن بیشتر و پراکنده تر ( دیسپرسه تر) در متن سنگ میزبان باشد IP بزرگتر خواهد بود، زیرا در این حالت سطح تماس جهت تبادل الکترونی-یونی به حداکثر خواهد رسید. اما درمورد بعضی از عوامل مانند مقاومت سنگ دربرگیرنده و غیره بطور قطع نمی‌توان اظهار نظر کرد. زیرا با تجربه‌ای که در عملیات زمینی به دست آمده در بعضی موارد با مقایسه نقشه‌های مقاومت ظاهری و شارژیابیته مشخص می‌شود نواحی که دارای IP قوی است دارای مقاومت ظاهری زیاد هم می‌باشد که این مسئله ناشی از سیلیسی شدن بخش‌های حاوی سولفید می‌باشد. مقاومت ویژه الکتریکی سیلیس به مراتب بالاتر و اثربخش‌تر از مقاومت ویژه الکتریکی پایین بخش‌های کانی‌سازی شده ناشی از سولفید خود را نشان می‌دهد.



شکل ۲: تغییرات ولتاژ قبل و بعد از قطع جریان نسبت به زمان.

یکی از روش‌های اندازه‌گیری شارژپذیری ظاهری در اندازه‌گیری ولتاژ رو به زوال IP در حوزه زمانی براساس نسبت  $\Delta V_{IP}/V_S$  می‌باشد. در این روش کمیت  $\Delta V_{IP}$  را در یک زمان معین (T) پس از قطع جریان اندازه‌گیری می‌کنند و نسبت آن را به  $V_S$  (ولتاژ اندازه‌گیری شده در زمان  $T_0$ ) با واحد میلی‌ولت بر ولت نشان می‌دهند. در این طریق زمان T درست کمی بعد از جریان  $T_0$  انتخاب می‌شود تا اثر جریان الکترومگنتیک ثانویه از بین برود. از سوی دیگر زمان T نباید زیاد طولانی باشد، زیرا ممکن است افت پتانسیل IP آنقدر زیاد باشد که به حد پارازیت برسد.

شکل ۳ انواع آرایش‌های الکترونی متداول (ونر، دایپل-دایپل، پل-دایپل، پل-پل، شلومبرژه و دایپل-دایپل استوایی) و نحوه‌ی چیدمان الکترودهای جریان و پتانسیل در آن‌ها را نمایش می‌دهد.

<p style="text-align: center;"><b>Wenner</b></p> <p style="text-align: center;"> <span style="color: red;">C1</span>      <span style="color: blue;">P1</span>      <span style="color: blue;">P2</span>      <span style="color: red;">C2</span>    <math>k = 2 \pi a</math> </p>	<p style="text-align: center;"><b>Wenner Beta</b></p> <p style="text-align: center;"> <span style="color: red;">C2</span>      <span style="color: red;">C1</span>      <span style="color: blue;">P1</span>      <span style="color: blue;">P2</span>    <math>k = 6 \pi a</math> </p>
<p style="text-align: center;"><b>Wenner Gamma</b></p> <p style="text-align: center;"> <span style="color: red;">C1</span>      <span style="color: blue;">P1</span>      <span style="color: red;">C2</span>      <span style="color: blue;">P2</span>    <math>k = 1.5 \pi a</math> </p>	<p style="text-align: center;"><b>Pole - Pole</b></p> <p style="text-align: center;"> <span style="color: red;">C1</span>      <span style="color: blue;">P1</span>    <math>k = 2 \pi a</math> </p>
<p style="text-align: center;"><b>Dipole - Dipole</b></p> <p style="text-align: center;"> <span style="color: red;">C2</span>      <span style="color: red;">C1</span>      <span style="color: blue;">P1</span>      <span style="color: blue;">P2</span>    <math>k = \pi n(n+1)(n+2) a</math> </p>	<p style="text-align: center;"><b>Pole - Dipole</b></p> <p style="text-align: center;"> <span style="color: red;">C1</span>      <span style="color: blue;">P1</span>      <span style="color: blue;">P2</span>    <math>k = 2 \pi n(n+1) a</math> </p>
<p style="text-align: center;"><b>Schlumberger</b></p> <p style="text-align: center;"> <span style="color: red;">C1</span>      <span style="color: blue;">P1</span>      <span style="color: blue;">P2</span>      <span style="color: red;">C2</span>    <math>k = \pi n(n+1) a</math> </p>	<p style="text-align: center;"><b>Equatorial Dipole - Dipole</b></p> <p style="text-align: center;"> <span style="color: red;">C2</span>      <span style="color: blue;">P2</span>    <math>k = 2 \pi a s / (s - a)</math>  <math>s = (a * a + b * b)^{0.5}</math> </p>
<p><b>NOTES:</b> <math>k</math> = geometric factor  <span style="color: red;">C</span> = <b>current source</b> electrodes  <span style="color: blue;">P</span> = <b>potential</b> (measuring) electrode  <math>a</math> = electrode separation; <math>n</math> = an integer</p>	

شکل ۳: انواع آرایش‌های الکترودی متداول و نحوه چیدمان الکترودهای جریان (C1 و C2) و الکترودهای پتانسیل (P1 و P2) در آنها

## طراحی سیستم چند الکتروودی هوشمند

برای داشتن چنین سیستمی تجهیزاتی از این قبیل نیاز خواهد بود:

- کابل چند رشته‌ای دارای رشته‌هایی با سطح مقطع لازم جهت ارسال جریان و دریافت اختلاف پتانسیل و ارسال کدهای دستوری. در فواصل معینی، خروجی‌هایی جهت اتصال به الکتروودهای هوشمند.

- چندین مدار الکترونیکی سویچ‌کننده برای اتصال به صورت سری در خروجی‌های مشخص شده و تعبیه شده در کابل.

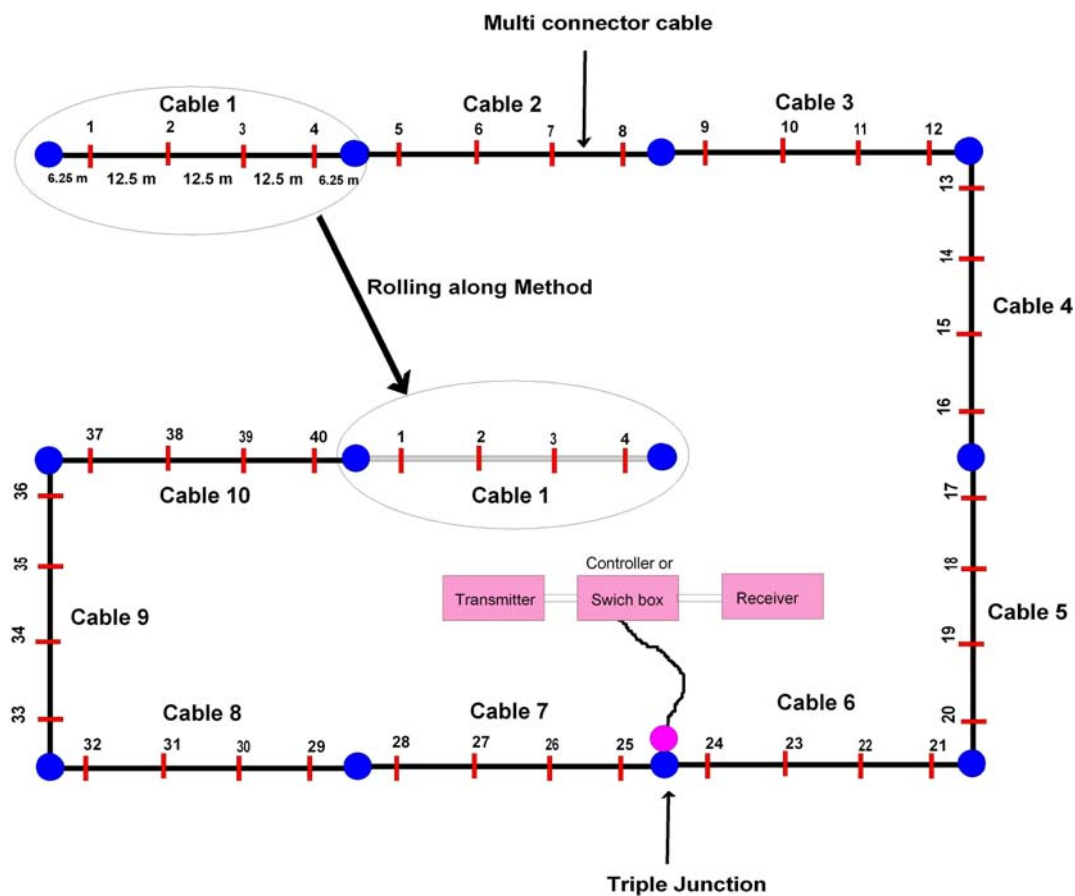
هر مدار سویچ‌کننده طوری طراحی شده که بتواند کد دستوری را که یک کد سه‌بخشی است را دریافت کند و بخش اول دستور را تغییر داده و یک واحد از آن کم کند و به مدار سویچ‌کننده‌ی مجاور ارسال نماید تا اینکه به دستور اجرایی در سویچ مورد نظر تبدیل شود و سویچ مورد نظر را فعال نماید. (وقتی بخش اول دستور ۱ شود این به معنی دستور اجرایی خواهد بود). در واقع بخش اول دستور مشخص‌کننده این است که کدام الکتروود هوشمند فعال گردد.

دومین بخش کد دستوری نیز مشخص می‌کند که کدام رشته موجود در کابل به الکتروود متصل شده به زمین وصل گردد.

در مطالعاتی که قطبش‌پذیری الکتریکی مورد مطالعه قرار می‌گیرد، نمی‌توان از همان الکتروودهای جریان جهت اندازه‌گیری قطبش القایی استفاده کرد و می‌بایست از الکتروودهای غیر قطبش‌پذیر استفاده گردد. از این الکتروودها برای ارسال جریان نمی‌توان استفاده کرد. بنابراین در هر خروجی کابل نیاز به دو نوع مختلف الکتروود-یکی برای ارسال جریان و دیگری برای اندازه‌گیری ولتاژ- وجود خواهد داشت. بخش سوم کد دستوری تعیین‌کننده این است که الکتروود خروجی الکتروود فرستنده/جریان‌خواد بود و یا الکتروود گیرنده/پتانسیل.

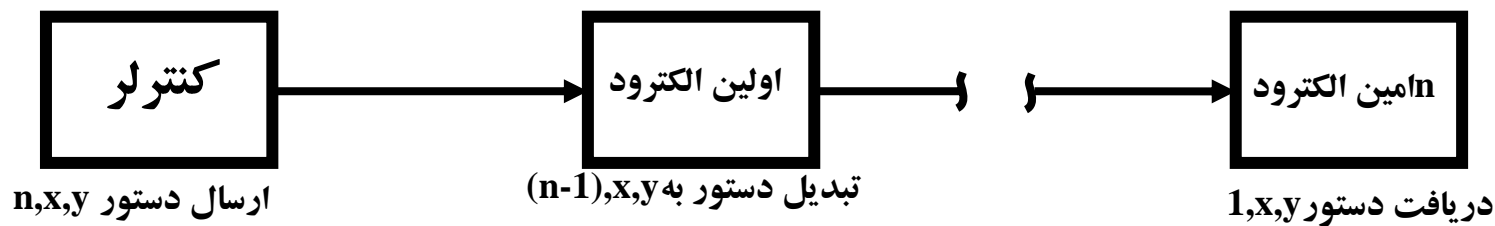


شکل ۴ طرح کلی از سیستم کابل چند الکترودی هوشمند را به تصویر کشیده است. این سیستم کابل می تواند در یک خط مستقیم چیده شود. طول این سیستم می تواند حدود ۴۰۰ تا ۵۰۰ متر باشد. برای اینکه بتوانیم مسیرهای طولانی تری را مورد مطالعه قرار دهیم، از تکنیک پرش در طول (Rolling along) کابل ها بهره گرفته می شود. به طور مثال، وقتی از کابل ۱ استفاده شد، این کابل می تواند به انتهای کابل آخر متصل گردد و دیگر بار مورد استفاده قرار گیرد.



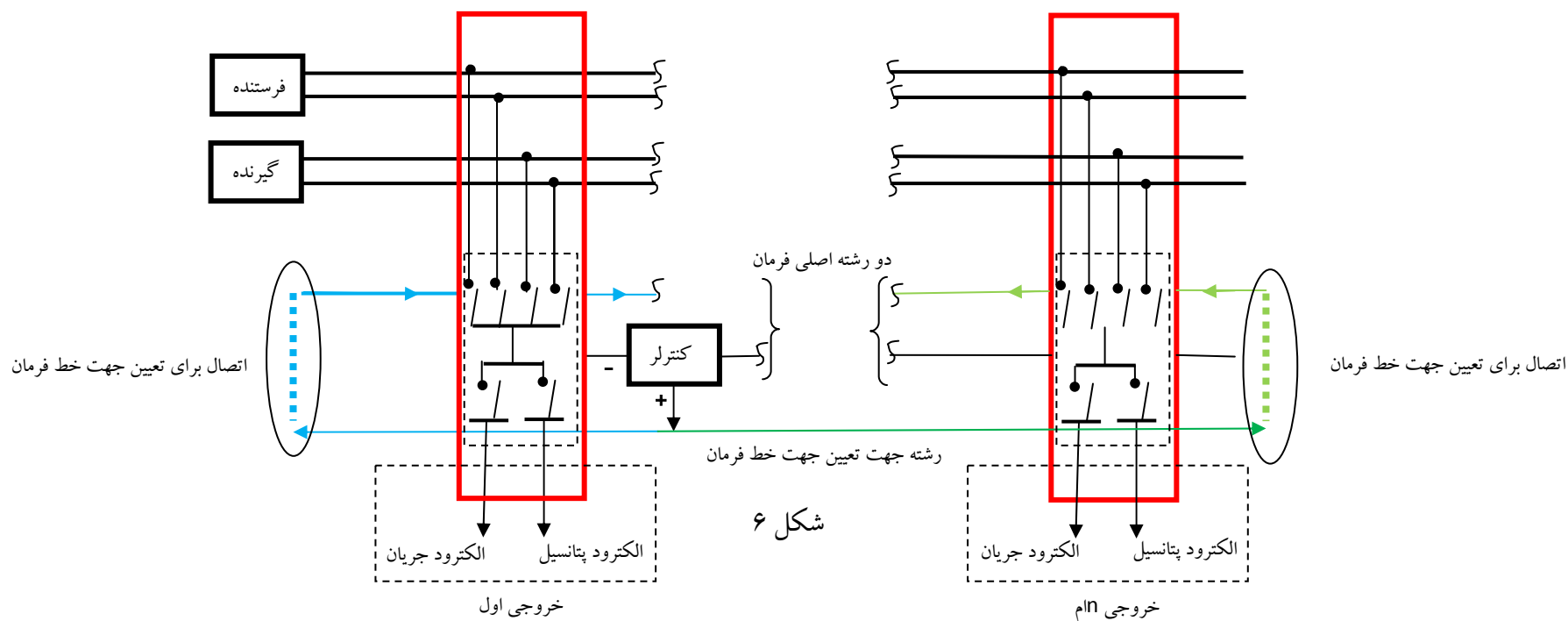
شکل ۴

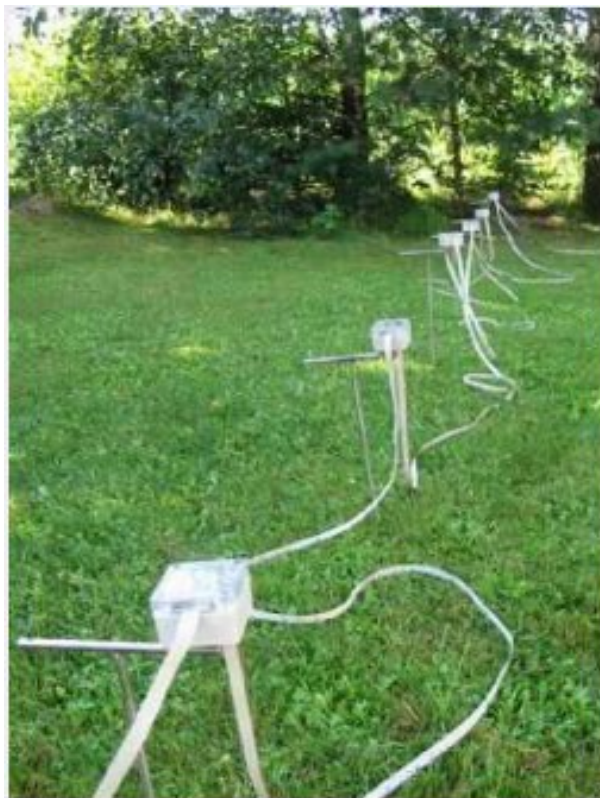
- در سیستم فوق، کابل رابط کنترل کننده (رابط کاربری) و سیستم کابل می تواند بین هر جفت دلخواه از کابل ها و یا در ابتدا و یا انتهای سیستم کابل وصل گردد. این می تواند در مواردی که جابجایی تجهیزات داده برداری به علت توپوگرافی شدید و سایر علل با محدودیت هایی همراه است، سودمند و مفید واقع گردد. در ضمن در صورت نیاز به جابجایی برخی از کابل ها در تکنیک پرش در طول جهت افزایش طول مقاطع داده برداری، با اتصال کابل رابط به محل مناسب، نیاز به جابجایی تجهیزات پس از جابجایی کابل ها وجود نخواهد داشت.
  - در هر خروجی کابل دو نوع الکتروود متمایز وجود خواهد داشت که یکی برای کاربرد ارسال جریان و دیگری برای اندازه گیری ولتاژ و قطبش پذیری القایی (افت ولتاژ در زمان) مورد استفاده قرار می گیرد.
  - در هر خروجی کابل یک مدار سویچ کننده الکترونیکی هوشمند و قابل برنامه ریزی قرار می گیرد که کار آن این خواهد بود که رشته ی معینی از کابل چند رشته ای را از طریق یک کد دستوری سه بخشی به خروجی مشخصی و با کاربری ارسال کننده جریان و یا گیرنده پتانسیل متصل نماید.
- شکل ۵ الگوریتم ارسال دستور اجرایی جهت فعال سازی  $n$  امین الکتروود هوشمند را نمایش می دهد. وقتی بخش اول کد دستور ۱ شود، آن الکتروود هوشمند فعال می شود.  $X$  مشخص کننده  $X$  امین رشته از کابل و  $Y$  بیانگر انتخاب مد الکتروود به عنوان فرستنده و یا گیرنده است.



شکل ۵

شکل ۶ یک طرح اولیه از سیستم چند الکترودی هوشمند را نشان می‌دهد. این یک سیستم دو کاناله را ترسیم کرده که یکی از کانال‌ها جهت ارسال جریان و دیگری جهت دریافت ولتاژ کاربرد دارد. همان طور که در شکل زیر نیز می‌بینید، در این سیستم از سه رشته جهت دستوردهی استفاده شده است. رشته از کنترلر فرمان را می‌گیرد و به هیچ کدام از سویچ‌کننده‌ها مستقیماً منتقل نمی‌کند. بلکه فرمان را در جهتی که این رشته را به رشته اصلی متصل کرده‌باشیم منقل می‌کند. در واقع بسته به اینکه این رشته به رشته‌ی اصلی فرمان از سمت چپ وصل شود و یا اینکه از سمت راست، جهت فرمان‌پذیری سویچ‌کننده‌ها را تعیین می‌کند. بدین ترتیب، کنترل‌کننده یا رابط کاربری و گیرنده و فرستنده می‌تواند در هر قسمت از سیستم کابل که اتصالاتی تعبیه شده باشد، با وصل نمودن یک جعبه سهراهی و یک کابل رابط متصل گردد. در صورت قرار گرفتن کنترلر و تجهیزات داده‌برداری در اولین و یا آخرین کابل، کافی است اتصال دهنده رشته تعیین جهت و رشته اصلی فرمان را به بخش آزاد سهراهی متصل نمود.





بهترین نمونه الکتروود هوشمند با کاربری  
دو گانه جهت استفاده به عنوان الکتروود جریان  
و یا پتانسیل



شکل ۷: نمونه‌هایی از سیستم چند الکتروودی هوشمند

ساخته شده (نمونه‌های خارجی)

با توجه به کابل‌های موجود در بازار داخلی، کابل‌های چند رشته‌ای AWG شیلد و فویل دار بهترین گزینه برای استفاده در چنین سیستمی خواهند بود. چرا که این کابل‌ها سیگنال مورد نظر را با کمترین اتلاف منتقل نمود و با توجه به داشتن فویل آلومینیومی و شیلد، علاوه بر دارا بودن کمترین استهلاک، نویزهای الکترومغناطیس مزاحم را نیز خنثی و تضعیف می‌نمایند. با توجه به اینکه رشته‌های این کابل می‌بایستی برای ارسال جریان تا حدود ۳ الی ۳/۵ آمپر جریان مستقیم و مربعی را مورد استفاده قرار گیرند،(بسته به نوع دستگاه‌های مورد استفاده، حداکثر جریان ارسالی متفاوت است، به‌طور مثال در دستگاه‌هایی که جریان خود را از باتری دریافت می‌کنند، حداکثر جریان عبوری حدود ۱ آمپر خواهد بود) بنابراین کابل ۱۰ رشته‌ای با ضخامت ۰/۵ میلیمتر مربع بهترین گزینه خواهد بود. استفاده از کابل‌های با رشته بیشتر باعث سنگینی کابل‌ها و ایجاد مشکلاتی در اجرا خواهد شد.

شکل ۸ نمونه‌ای از این کابل‌ها را نشان می‌دهد.



شکل ۸

