

«اگر می‌خواهید بفهمید که مغزتان ضعیف است یا خیر، پاهای خود را حس کنید.»

بروس بارتون

محتوای فصل

- ◀ آناتومی
- ◀ عضلات چندمفصلی
- ◀ نوروآناتومی
- ◀ جفت شدن تحریک انقباض^۱
- ◀ انواع فیبر
- ◀ ساختار عضله
- ◀ الکترومایوگرافی دینامیک
- ◀ همپوشانی
- ◀ آثار حرکتی
- ◀ ضد بدنمایی (Anti-aliasing)
- ◀ لفاف‌گذاری (Enveloping)
- ◀ سوئیچ‌های کف پا (Footswitches)
- ◀ اندازه‌گیری از راه دور
- ◀ نرمال‌سازی
- ◀ عوامل مؤثر بر ارتباط بین الکترومیوگرافی و نیروی عضلانی
- ◀ الکترومیوگرافی هنجار شده^۲
- ◀ تأثیر خستگی
- ◀ ویژگی‌های بافت پیوندی غیرفعال^۳
- ◀ تخمین طول عضله

1 Excitation-contraction coupling

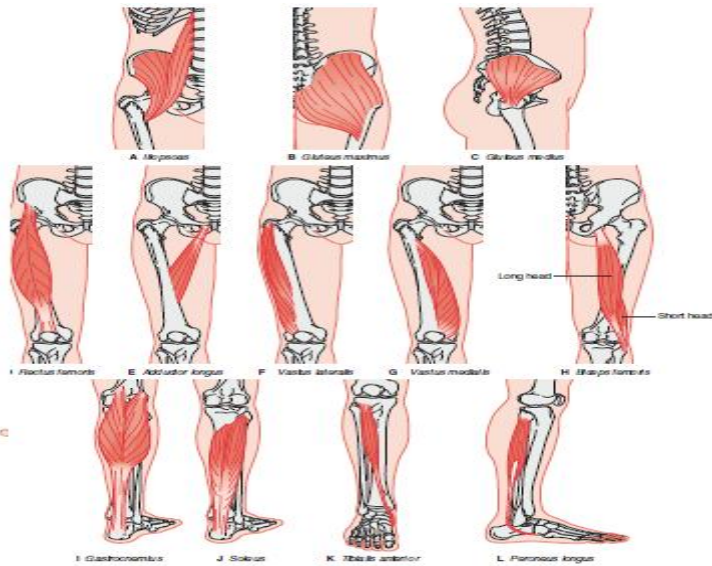
2 Normative EMG

3 Passive connective tissue properties

عضلات، منبع مکانیکی راه رفتن هستند و هر کدام دقیقاً برای انجام وظایف خود در چرخه راه رفتن تخصصی شده‌اند.

آناتومی

ارزش بررسی برخی از عناصر نوروآناتومی و نوروفیزیولوژی عضلات اصلی اندام تحتانی در راه رفتن، در جدول ۸-۱ ذکر شده و در شکل ۸-۱ نشان داده شده است.



شکل ۸-۱- عضلات اصلی در راه رفتن

جدول ۸-۱- گروه‌های عضلانی اصلی درگیر در راه رفتن. زانو برای حرکت در صفحه ساجیتال محدودیت دارد؛ به همین دلیل، برای حرکت در صفحه فرونتال، هیچ عضله‌ای ندارد. فعالیت عضلانی در صفحه عرضی در نظر گرفته نشده است.

صفحه فرونتال	صفحه ساجیتال	مفصل
ابداکتور: گلو تئوس مدیوس / مینیوس ادداکتور: ادداکتور مگنوس / لانگوس	فلکسور: ایلوپسوآس اکستنسور: گلو تئوس ماگزیموس، همسترینگ فلکسور: همسترینگ	هیپ زانو
اورتور: تیپالیس آتریور، تیپالیس پوستریور اینورتور: پرونتال	اکستنسور: کوادریسپس (وستوس و رکتوس فموریس) دورسی فلکسور: تیپالیس آتریور پلنتار فلکسور: تریسپس سورا (سولئوس و گاستروکنمیوس)	مچ پا

عضلات چندمفصلی

بعضی از عضلات از دو (دومفصلی) یا تعداد بیشتری (چندمفصلی) مفصل عبور می کنند. عملکرد عضلات دومفصلی پسوآس، همسترینگ، گاستروکنمیوس و رکتوس فموریس به شدت مورد بحث است. یکی از نقش های احتمالی آن ها انتقال انرژی بین مفاصل است (لیبر، ۱۹۹۰؛ ولز، ۱۹۹۸)؛ مثلاً ممکن است همسترینگ در انتهای مرحله تعلیق، انرژی اکستنشن زانو را به اکستنشن هیپ، انتقال دهد (پریلوتسکی و همکاران، ۱۹۹۸؛ کوئو، ۲۰۰۱)؛ همچنین ممکن است عضلات دومفصلی نسبت به عضلات تک مفصلی، در تولید نیروهای برشی در پا، بهتر عمل کنند (هاف، ۲۰۰۱).

پرسش ۸-۱: کدام یک از عضلات زیر، چندمفصلی است؟

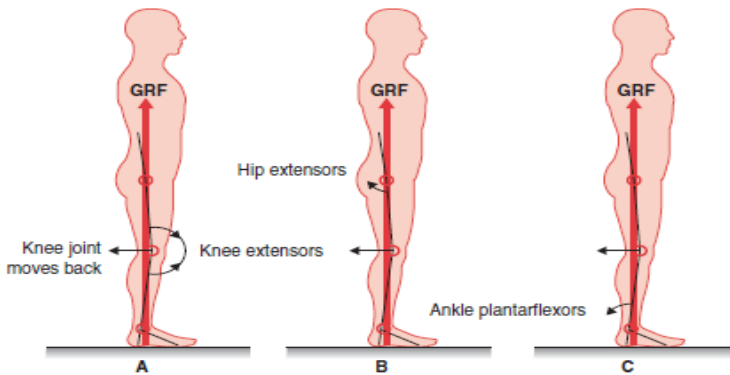
- (۱) پسوآس
- (۲) ایلیاکوس
- (۳) سولئوس
- (۴) تیپالیس آتریور

عملکرد در فاصله ای دور^۱

مهم است بدانیم که عضلات می توانند بر مفاصلی که از آن ها دورند نیز تأثیر داشته باشند. یک مثال واضح برای این قضیه، کنترل زانو در حین ایستادن است که اگر نیروی واکنش زمین از پشت زانو عبور کند، باعث بی ثباتی آن می شود. راه های متفاوتی وجود دارد که این ثبات بازایی شود که واضح ترین آن، فعال شدن اکستنسورهای زانو است

¹ Action at a distance

(شکل ۸-۲-الف). البته توجه داشته باشید که انقباض اکستنسورهای هیپ (شکل ۸-۲-ب) یا پلنتار فلکسورهای مچ پا (شکل ۸-۲-پ)، نتیجه مشابهی خواهد داشت. در شکل (ت) ران و در شکل (ث) ساق، به عقب کشیده شده است که هر دو با اکستنشن کردن زانو و کشیدن نیروی عکس‌العمل زمین به پشت آن، باعث بازیابی یک پوسچر باثبات می‌شوند؛ بنابراین، اگرچه گلوئوس ماگزیموس و سولئوس، به ترتیب اکستنسور هیپ و پلنتار فلکسور هستند، اما در این موقعیت هر دو به‌عنوان اکستنسور زانو عمل می‌کنند.



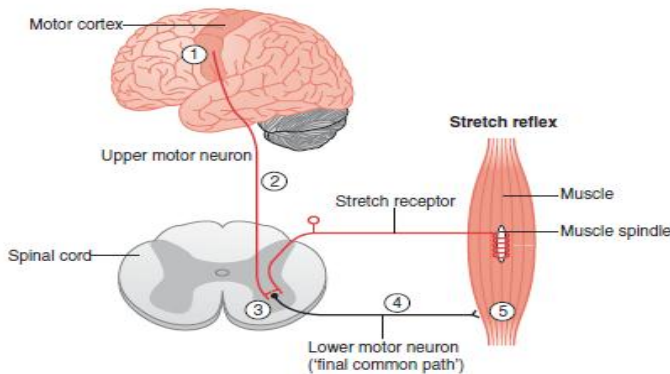
شکل ۸-۲- موقعیت عبور محور نیروی واکنش زمین، از مفاصل مچ پا و زانو و ران

در بیشتر فعالیت‌های دینامیک، فعالیت عضلانی می‌تواند بسیار پیچیده و غیرقابل مشاهده باشد؛ برای مثال، نشان داده شده است که گاستروکمیوس، در مواقع خاصی به‌عنوان اکستنسور زانو، عمل می‌کند (زاجاک و گوردون، ۱۹۸۹). ثبات زانو در طول راه رفتن، می‌تواند با فعالیت عضلات اندام سمت مقابل نیز ایجاد شود. نهایتاً انقباض بهینه عضلات یک فرد، به وضعیت همه‌قسمت‌های بدن فرد بستگی دارد و همین باعث می‌شود پیش‌بینی تأثیر انقباض یک عضله خاص، بدون مدل‌های دقیق بیومکانیکی، دشوار باشد (زاجاک و همکاران، ۲۰۰۳). عضلات چندمفصلی، تأثیر بسیار پیچیده‌تری دارند (کوئو، ۲۰۰۱). پژوهش‌های اخیر نشان داده است که طبقه‌بندی زنجیره باز آناتومیک عضلات، در بهترین حالت، غیردقیق و گاهی اوقات کاملاً اشتباه است. بهترین برداشت آن است که فعالیت عضله، وابسته به وظیفه خاص آن است؛ به عبارت دیگر، عضلات در مجموع به حالتی عمل می‌کنند که وظیفه خود را به‌طور مناسبی انجام دهند.

نورواناتومی

انقباض هر عضله، با تحریک یک نورون حرکتی فوقانی در کورتکس مغز آغاز می‌شود که از طریق مسیر هرمی با نورون حرکتی تحتانی، در شاخ جلویی طناب نخاعی، جایی که عصب‌دهی ریشه نخاعی به عضلات انجام می‌شود، سیناپس می‌کند (شکل ۸-۳). توجه داشته باشید که نورون‌های دستگاه عصبی مرکزی، مثل مغز و طناب نخاعی، زمانی که آسیب ببینند توانایی ترمیمی محدودی دارند؛ اما آن‌هایی که در دستگاه عصبی محیطی قرار دارند، مثل ریشه‌های عصبی و نورون‌های محیطی، بعد از آسیب، با سرعت یک میلی‌متر در روز، بازسازی می‌شوند (بازسازی والرین^۱).

از آنجا که رفلکس کششی عموماً از طریق فیبرهای پایین‌رونده نورون حرکتی فوقانی مهار می‌شود، آسیب در ماده سفید باعث سندرم نورون حرکتی فوقانی خواهد شد که خود را به صورت فلج اسپاستیک، همراه با افزایش تون عضلانی و افزایش رفلکس‌ها نشان می‌دهد؛ از طرف دیگر، قطع اعصاب مربوط به عضلات که به دلیل آسیب‌های نورون حرکتی تحتانی اتفاق می‌افتد، باعث شلی عضلات همراه با آتروفی عضلانی می‌شود.



شکل ۸-۳- نمای کلی کنترل حرکتی. این شکل محل ضایعات متدوال اثرگذار بر گام‌برداری را نشان می‌دهد که عبارت است از: ۱. قشر حرکتی: سکتۀ مغزی، آسیب ناحیه سر؛ ۲. نورون حرکتی بالایی: فلج مغزی، آسیب نخاعی، بیماری ام اس، میلوپاتی؛ ۳. سلول‌های شاخ قدامی: اسپینا بایفیدا، فلج اطفال، بیماری نورون حرکتی؛ ۴. اعصاب محیطی: سیاتیکا، فلج عصب پرونرال مشترک؛ ۵. دیستروفی عضلانی، بیماری محل اتصال عصب و عضله، میاستنی گراویس.

1 Wallerian regeneration

پرسش ۸-۲: کدام یک از موارد زیر مشخصاً باعث فلج شل می‌شود؟

(۱) آسیب طناب نخاعی

(۲) فلج مغزی

(۳) فلج اطفال

(۴) سکته

جفت تحریک-انقباض

پتانسیل عمل به صفحه‌ انتهایی واحد حرکتی که توسط نورون حرکتی تحتانی عصب‌رسانی می‌شود، می‌رسد. تعداد فیبرهای عضلانی هر واحد حرکتی، بسته به دقت و ظرافت حرکات، متنوع بوده و در بیشتر عضلات اندام تحتانی، حدود ۲۰۰۰ فیبر است (فین استین و همکاران، ۱۹۵۵). پتانسیل عمل یک واحد حرکتی که با آزاد شدن استیل کولین انجام می‌شود، می‌تواند باعث آزاد شدن کلسیم از شبکه‌ سارکوپلاسمی شود. این کلسیم به پروتئینی به نام تروپونین-تروپومیوزین متصل شده، شکل آن را تغییر می‌دهد و پل‌های عرضی را بین فیلامان‌های اکتین و میوزین تشکیل می‌دهد. آدنوزین‌تری‌فسفات به‌عنوان یک منبع نیروی مولکولی به میوزین متصل شده و یک نیروی انفجاری تولید می‌کند. ADP و P از میوزین جدا گشته و یک ملکول ATP جدید به آن متصل می‌شود که به میوزین اجازه می‌دهد تا اکتین را رها کند و دوباره این چرخه در یک سازوکار چرخه‌ای به نام *Grap and swivel* ادامه پیدا کند.

نیروی عضله، حاصل جمع نیروهای کوچک تولیدشده در هر تار عضلانی است. لازم است بدانیم تولید نیرو در هر تار عضلانی «اثری همه یا هیچ» دارد (هاتز، ۱۹۹۷). افزایش نیرو حاصل فراخوانی واحدهای حرکتی بیشتر (جمع فضایی) و افزایش میزان انقباض واحدهای حرکتی (جمع زمانی) است (میلنر-براون و همکاران، ۱۹۷۳). همه تارهای عضلانی اندازه یکسانی ندارند، براساس اصل اندازه، کوچک‌ترین تارها کم‌ترین آستانه تحریک را دارند؛ به همین دلیل، ابتدای انقباض، تارهای کوچک‌تر زودتر فراخوانی می‌شوند (هنمن و همکاران، ۱۹۶۵).

نورون حرکتی فوقانی، به‌طور طبیعی تون عضلات را مطابق با فعالیت رفلکس کششی تک‌سیناپسی (قوس رفلکسی) تنظیم می‌کند. زمانی که کنترل نورون محرکه فوقانی از بین برود (نورون محرکه تحتانی سالم باشد) قوس کششی با شدت بیشتری فعالیت می‌کند و عضله دچار اسپاستیسیتی می‌شود. در صورتی که نورون محرکه تحتانی

(انتهای مسیر مشترک شرینگتون) قطع شود یا از بین برود، عصبدهی عضله از بین می‌رود که این موضوع به فلج شل خواهد انجامید.

انواع فیبرهای عضلانی

اگرچه همه فیبرهای عضلانی مشابه‌اند، اما ویژگی‌هایشان می‌تواند با توجه به نورون حرکتی‌ای که آن‌ها را عصبدهی می‌کند، مشخص شود (بورک و همکاران، ۱۹۷۹). سه نوع مشخص برای تارهای عضلانی بیان شده است: Type I, Type IIA and Type IIB (جدول ۸-۲). فیبرهای نوع I متابولیسم هوازی دارند؛ به جریان خون متکی است و قادر به تولید نیروی کم تا متوسط بدون خستگی در طول دوره‌های طولانی هستند (انقباض تونیک). فیبرهای نوع IIB، ویژگی‌های متقابل و مکملی دارند؛ بیشتر وابسته به متابولیسم غیرهوازی گلیکولیتیک هستند؛ سریع‌ترند، اما به سرعت خسته می‌شوند و قطر بیشتری دارند؛ بنابراین توانایی تولید نیروی بیشتری را دارند. فیبرهای نوع IIA که بین این دو نوع قرار دارند، توانایی فعالیت سریع و تکراری دارند.

به‌طور کلی، فیبرهای عضلانی تندانقباض^۱ مقدار کمی انرژی را خیلی سریع تولید می‌کند؛ درحالی‌که عضلات کندانقباض^۲ مقدار زیادی انرژی را در مدت طولانی تولید می‌کند. توالی فراخوانی فیبرهای عضلانی از I به IIA و IIB است که به‌منظور افزایش نیروی مورد نیاز انجام می‌شود. گوشت تیره که در پاهای مرغ وجود دارد، برای ایستادن و راه رفتن استفاده می‌شود و بیشتر از فیبرهای کندانقباض تشکیل شده است. گوشت سفیدی که در سینه دیده می‌شود، اکثراً از فیبرهای عضلانی تندانقباض تشکیل شده و برای پرش‌های کوتاه که نیاز به انرژی بیشتر دارد، استفاده می‌شود. ضعف و آتروفی همراه با بسیاری از بیماری‌هایی که راه رفتن فرد را تحت تأثیر قرار می‌دهند، به‌طور خاص فیبرهای نوع I را تحت تأثیر قرار داده و باعث غلبه فیبرهای تندانقباض می‌شود.

پرسش ۸-۳: کدام یک، از ویژگی‌های یک عضله پوسچرال است؟

(۱) متابولیسم هوازی

(۲) تندانقباضی

(۳) فیبرهای بزرگ

(۴) فعالیت زیاد MTPase

1 fast twitch

2 slow twitch

جدول ۸-۲ ویژگی‌های متقابل انواع مختلف تارهای عضلانی

	Type I S (slow)	Type IIA FR (fast resistant)	Type IIB FF (fast fatiguable)
Contraction	tonic	phasic	phasic
Excitation coupling delay	long	short	short
Fibre size	small	intermediate	large
Threshold	low	high	high
Mitochondria	many	intermediate	few
Vascularity	rich	rich	poor
Myoglobin content	rich	rich	poor
Metabolism	aerobic (oxidative)	intermediate	anaerobic (glycolytic)
Myosin ATPase activity	low	low	high
Fatigue	resistant	intermediate	vulnerable
Peak tension	low	intermediate	high
Time to peak force	long (60-120 ms)	short	short (10-50 ms)
Function	tonic (postural)	repetitive phasic	phasic motion
Examples	<i>soleus, gluteus maximus</i>	<i>gastrocnemius</i>	hamstrings

نوع I (کندانقباض) برای فعالیت کم‌شدت و مقاوم به خستگی اختصاصی شده است؛ درحالی‌که تارهای نوع IIB (تندانقباض) برای انقباضات سریع و شدید مناسب است. تارهای نوع IIA به‌عنوان تارهای میانه، ویژگی مابین دونوع تار دیگر را دارد (سریع و نسبتاً مقاوم به خستگی).

ساختار عضله

فیبرهای عضله در بیشتر عضلات، به‌جای آنکه موازی با تاندون قرار گیرند، تشکیل یک زاویه می‌دهند که زاویه «پری‌شدن»^۱ نامیده می‌شود و باعث می‌گردد سطح مقطع فیزیولوژیک عضله افزایش پیدا کند که این موضوع سبب افزایش ظرفیت تولید نیرو، در ازای کاهش سرعت کوتاه‌شدن عضله می‌شود. اختلاف مهم دیگر بین عضلات، نسبت تاندون به طول عضله است (جدول ۸-۳).

جدول ۸-۳- ویژگی‌های ساختاری برخی از عضلات اساسی در اندام تحتانی (ویکیویز، ۱۹۸۳)

Muscle	Fibre length (mm)	PCA (mm ²)	Pennation angle (°)	Tendon/fibre length	Twitch time (ms)
<i>Rectus femoris</i>	68	1250	5	5	
<i>Vastus lateralis</i>	67	3000	5	2.7	
<i>Soleus</i>	30	5800	30	11.3	
<i>Gastrocnemius</i>	48	3000	15	8.9	

1 Pennation angle

الکترومایوگرافی پویا

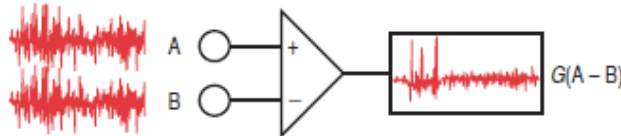
مجموع پتانسیل عمل همه واحدهای حرکتی ای که در یک زمان فعال می‌شوند، باعث فعالیت الکتریکی ای به نام «الکترومایوگرام» می‌شود که می‌تواند از طریق الکترودهایی که روی سطح پوست قرار می‌گیرند (SEMG) یا الکترودهای سوزنی‌ای که در بالک عضله فرو می‌روند، جمع‌آوری شود (بوگی و همکاران، ۲۰۰۰). سیگنال‌های الکترومیوگرافی که از طریق الکترودهای سطحی جمع‌آوری می‌شود، خیلی کوچک و کمتر از ۱ میلی‌ولت است؛ بنابراین شدت امواج به‌منظور ضبط و پخش، باید با استفاده از آمپلی‌فایر افزایش پیدا کند. با وجود این، یک مشکل بالقوه در انجام این کار است؛ اینکه هرگونه نویز الکتریکی را در پس‌زمینه که توسط لامپ‌های فلورسنت، موتورهای یا کامپیوترهایی که در مجاورت فرد مورد نظر ایجاد می‌شود، تقویت می‌کند. در گذشته، آزمایشگاه‌ها به اتاق فارادی^۱ مجهز بودند تا فرد مورد نظر را از این نویزها جدا کنند؛ اما خوشبختانه آمپلی‌فایرهای مدرن این نیاز را غیرضروری می‌سازند. این شکل آمپلی‌فایر تفاضلی است که تفاوت بین دو پایانه ورودی خود را با یک بهره بالا (حدود ۱۰۰۰) افزایش می‌دهد؛ درحالی‌که بهره بسیار کوچکی برای ولتاژ موجود در هر دو پایانه دارند. زمانی که سیگنال‌ها تقویت می‌شوند، نویزهای الکتریکی ای که در هر دو پایانه، مشترک هستند، حذف می‌شوند (شکل ۸-۴). $CMRR$ (common mode rejection ratio) برای آمپلی‌فایر الکترومیوگرافی بسیار بزرگ است. به‌طور معمول ۹۰-دسی‌بل است که این واحد راهی ساده برای بیان نسبت بین دو کمیت است:

$$90\text{dB} = 20 \log_{10} (\text{بهره مشترک} / \text{تفاضلی})$$

$$10^{90/20} = \text{بهره مشترک} / \text{بهره تفاضلی}$$

$$10^{4.5} = 30000 \text{ یا}$$

فرض بهره تفاضلی ۱۰۰۰، بدین معنی است که بهره مشترک باید $1000 / 30000 = 1/30$ باشد؛ به عبارت دیگر، درحالی‌که سیگنال الکترومیوگرافی، هزار برابر بزرگ‌تر می‌شود، آمپلی‌تود نویزها، ۳۰ واحد کوچک‌تر می‌شود.



شکل ۸-۴- یک آمپلی‌فایر تفاضلی که نویز موجود در هر دو پایانه ورودی (که مشترک‌اند) را نادیده می‌گیرد و فقط تفاوت موجود را با بهره مشخص G تقویت می‌کند.

پرسش ۸-۴: در آمپلی‌فایری با CMRR of 100 dB و بهره تفاضلی ۱۰۰۰، میزان خنثی‌سازی نویز چقدر است؟

(۱) ۱/۱۰

(۲) ۱/۳۰

(۳) ۱/۱۰۰

(۴) ۱/۱۰۰۰

آمپلی‌فایرهای مدرن، ثبت امواج را به‌طور ویژه‌ای ساده کرده است؛ اما توجه داشته باشید که عملکرد آن به این بستگی دارد که نویزها در هر دو ورودی جریان وجود داشته باشند؛ بنابراین برای حصول بهترین نتیجه باید الکترودها تا جایی که ممکن است بدون همپوشانی نزدیک یکدیگر قرار گیرند. خوشبختانه، فیبرهای یک واحد حرکتی، کاملاً تصادفی در طول عضله پراکنده شده است؛ بنابراین سیگنال دریافت‌شده توسط یک الکتروده سطحی، به‌طور منطقی نشان‌دهنده کل عضله است. محل قرارگیری الکترودها، اهمیت زیادی ندارد؛ اما به‌طور معمول، روی مرکز بالک عضله، به‌صورت طولی قرار می‌گیرند (باسماجین و دلوکا، ۱۹۸۵). واحدهای حرکتی قطورتر (به‌خصوص IIB) نسبت به فیبرهای نوع I که کوچک‌تر و آهسته‌تر هستند، پتانسیل بیشتری تولید می‌کنند. به‌طور کلی الکترودهای غیرفعال از نقره و کلرید نقره (Ag/AgCl) تشکیل شده‌اند و اندازه‌شان ۷ تا ۲۰ میلی‌متر است (شکل ۸-۵)؛ همچنین یک‌بار مصرف و چسبان‌اند و حاوی ژل هدایت‌کننده هستند. انواع چندبار مصرف نیز گاهی اوقات استفاده می‌شود که باید قبل از استفاده از آن‌ها، از ژل استفاده کرد؛ همچنین برای چسباندن الکتروده روی سطح پوست باید از نوار چسب استفاده کرد که تاحدودی باعث می‌شود استفاده از آن‌ها غیربهداشتی باشد. در حال حاضر، بسیاری از شرکت‌ها یک پیش‌آمپلی‌فایر در یک الکتروده فعال دارند (شکل ۸-۶).



شکل ۸-۵ - الکترودهای یک‌بار مصرف، خودچسب Ag/AgCl (ناحیه هدایت ۱۰ میلی‌متر) با متصل‌کننده

ضربه‌ای). الکترودهای جفتی نیز در دسترس هستند (با فاصله بین الکترودهی ۲۰ میلی‌متر).