فناوری و تکنیک رکاب‌زدن

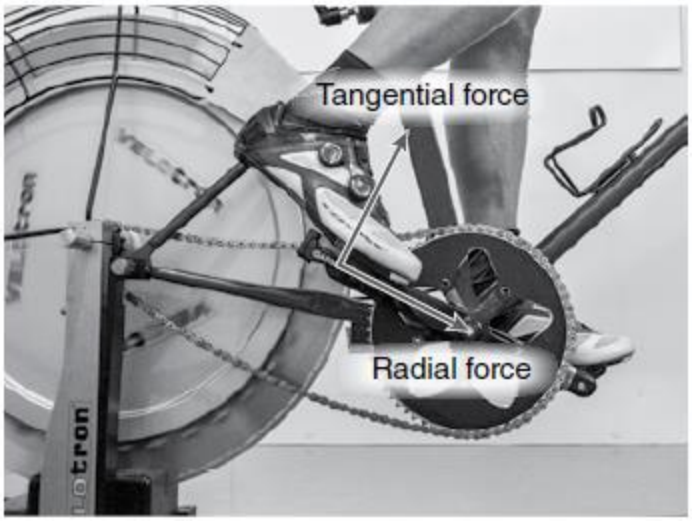
توماس کرف، مارکو آرکستجین، و پاول بارات

اندازه‌گیری شاخص های مکانیکی دوچرخه‌سواری در بسیاری از زمینه‌ها پراهمیت است. برای مثال مربیان، دوچرخه‌سواران، یا دانشمندان ممکن است علاقه مند به حداکثر توان تولیدی یک دوچرخه سوار بر روی دوچرخه، توانی که دوچرخه سوار در طی دوچرخه سواری تولید می‌کند یا تکنیک مورد استفاده برای انتقال نیرو از پا به پدال‌ها باشند. تصمیم‌گیری در مورد مناسب‌ترین فناوری معمولاً به هدف مشخصِ معیار و در دسترس بودن آن فناوری بستگی داشته و بر همین اساس گرفته می‌شود. مبحث و مسائل مربوط به فناوری رکاب‌زنی و تکنیک آن، می‌تواند با مروری بر مفاهیم مربوط به مکانیک و آناتومی رو به پیشرفت حرکت کند. از همین رو این بخش به سه قسمت تقسیم می‌شود. در قسمت اول ما اصول مکانیکی و آناتومیک دوچرخه‌سواری را توصیف می‌کنیم، در قسمت دوم فناوری‌های رکاب‌زدن را مورد بحث قرار می‌دهیم. بر اساس این مفاهیم علمی و فناوری، بخش سوم این فصل، نظریه را به مسائل عملی پیرامون تکنیک رکاب زنی، پیوند می‌دهد.

اصول بنیادی مکانیکی و علمی

در بیشتر مسابقه‌ها، سرعت دوچرخه‌سواری معیار نهایی عملکرد است. ورزشکاری که سریع‌تر از همه رکاب بزند در مسابقه برنده می‌شود. در سطح مکانیکی، سرعت دوچرخه‌سواری توسط تفاوت میان نیروهای مقاومتی و حرکتی اندازه گیری می‌شود که بر دوچرخه و دوچرخه سوار اعمال می‌شوند. با توجه به همین موضوع، مقاومت آیرودینامیک مهم‌ترین نیروی مقاومتی است. پس از نظر عملکردی، به حداقل رساندن این متغیر اهمیت دارد نیروهای حرکتی نیز نیروهایی هستند که از پای دوچرخه‌سوار به پدال ها وارد می‌شوند. در طول دوچرخه‌سواری، نیروهای عضلانی از طریق پاهای راست و چپ به طور همزمان به پدال ها (به صورتی متناوب) وارد می‌شوند. در هر سو، نیروی پدال ممکن است به دو بخش مماسی[1] و شعاعی[2] تقسیم شود (شکل ۵,۱ را ببینید):

[1] tangential
[2] radial



شکل ۵,۱ طرح کلی از نیروهای قامه مماسی و شعاعی

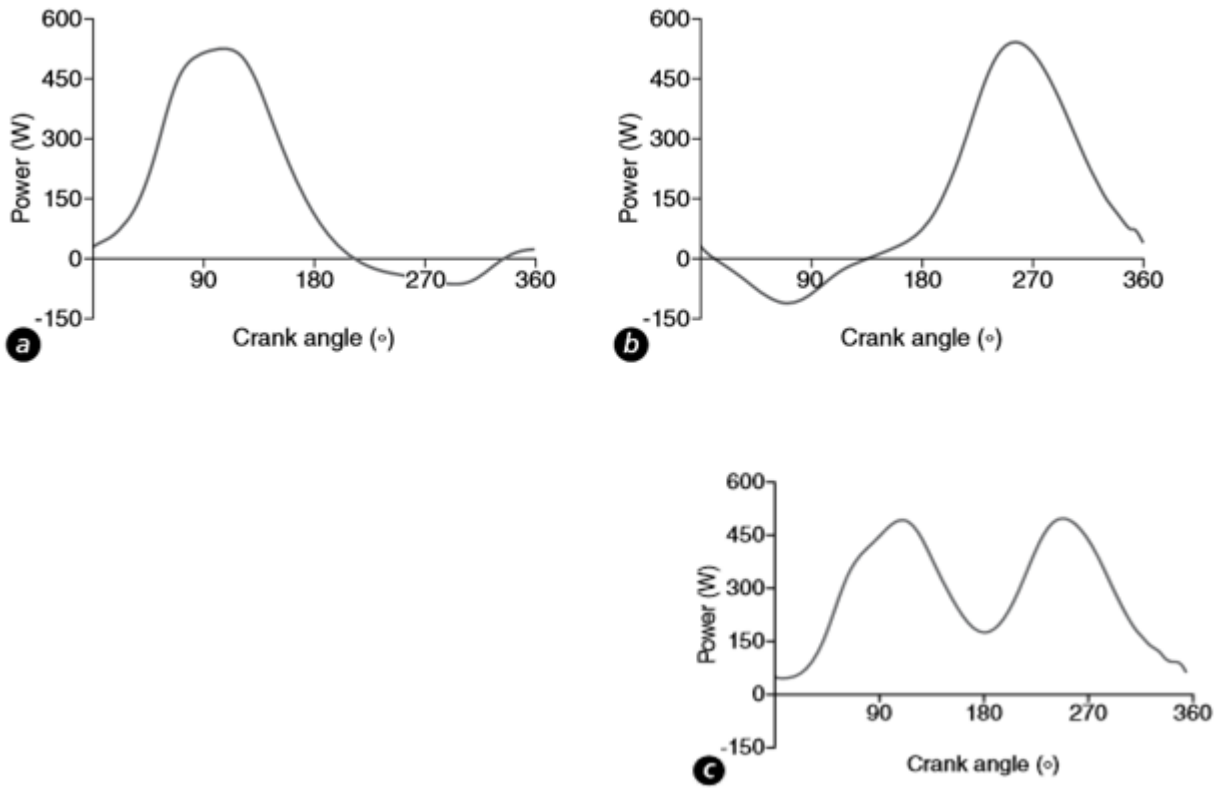
- بخش مماس نیرو، عملکرد مکانیکی را بر عهده دارد (مثلا حرکت ایجاد می‌کند) زیرا همیشه در جهت حرکت عمل می‌کند.
- بخش شعاعی نیروی پدال، به سوی مرکز قامه چرخشی هدایت شده و عملکردی ندارد.
- مجموع نیروهای مماس (واحد اندازه‌گیری نیوتنN) یک گشتاور در اطراف قامه ایجاد می‌کند (با معیار نیوتن متر اندازه‌گیری شدهNm) که می‌تواند توسط ضرب مجموع نیروهای مماس پدال چپ و راست در طول قامه محاسبه شود.
- توان قامه (واحداندازه‌گیری واتW) هم می‌تواند توسط ضرب گشتاور قامه در تندی زاویه‌ای[۳] محاسبه شود.

رابطه میان توان پدال چپ و راست و توان کلی قامه در شکل ۵,۲ به نمایش گذاشته شده است. شکل ۵,۲a توان تولیدی توسط پای راست را نشان می‌دهد. می‌توان دید که قسمت اعظم توان توسط ضربه‌های رو به پایین (بین ۰ تا ۱۸۰ درجه در چرخه قامه با بیشینه حدود ۹۰ درجه، مختصات ساعت ۳ قامه) تولید می‌شود. شکل توان پای چپ (شکل ۵,۲b) نیز مشابه همین است اما ۱۸۰ درجه بیرون این مرحله قرار دارد؛ قسمت اعظم توان پدال چپ در مرحلهٔ ریکاوری پای راست ایجاد می‌شود (برای مثال ۱۸۰ تا ۳۶۰ درجه). جمع توان پدال راست و چپ در هر نقطه‌ای از این چرخه، برابر با میزان توان کلی قامه در شکل ۵,۲c خواهد بود.

[3] angular velocity

فهم این رابطه ساده ریاضی برای درک ابزارهای اندازه‌گیری توان یا نیرو، اهمیت بسیاری دارد. همان طور که پس از این خواهیم دید، بسیاری از سیستم‌های امروزی گشتاور یا توان کلی قامه را محاسبه می‌کنند (برای مثال تاثیر ترکیبی نیروهای تولیدی در چپ و راست)، که تاثیرات قابل توجهی بر تفسیر چنین داده‌هایی خواهد داشت.

رابطه میان نیرو، گشتاور و توان می‌تواند با یک مثال ساده عملی نشان داده شود. فردی را تصور کنید که بر یک دوچرخه ثابت نشسته و می‌خواهد توان خود را افزایش دهد این واقعیت که توان، حاصل جبری گشتاور قامه و تندی زاویه‌ای قامه است، نشانگر این امر است که دوچرخه‌سوار می‌تواند یا با افزایش مقاومت (گشتاور قامه) و یا با بالا بردن دور پا (شتاب زاویه‌ای) توانش را بالا ببرد. اما در عمل، افزایش مقاومت معمولاً همراه با کاهش دور پا(شتاب زاویه‌ای) است که بر هدف اولیه یا همان افزایش توان، تاثیری منفی دارد. به همین دلیل، در این موقعیت افزایش مقاومت تنها در صورتی منطقی خواهد بود که دور پا به میزانی پایین‌تر از میزان اولیه خود نرسد.

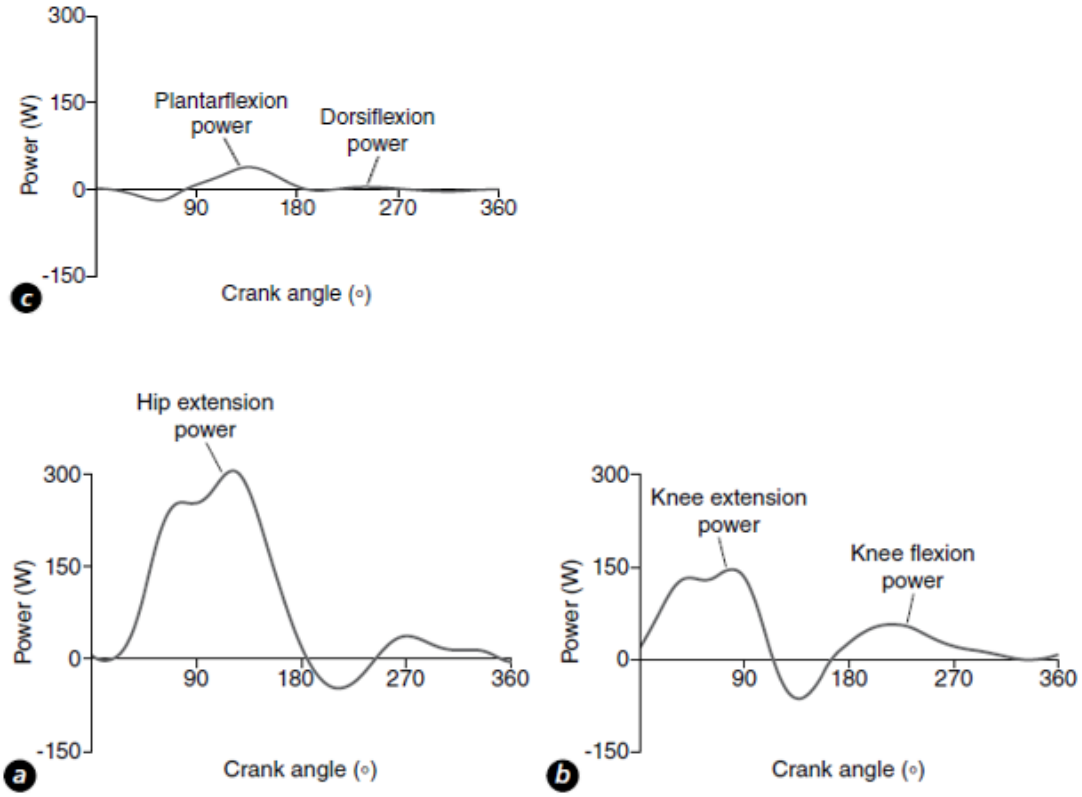


شکل ۵,۲ رابطه میان توان پدال و توان قامه. (**a**) توان پدال راست در ضربه‌های رو به پایین مثبت است (۰-۱۸۰ درجه) و در ۹۰ درجه به بیشترین مقدار خود می‌رسد. (**b**) میزان توان پای مخالف (چپ) از نظر شکل مشابه است اما ۱۸۰ درجه بیرون از این مرحله قرار دارد. بنابراین، احتمالاً در مرحلهٔ ریکاوری پای راست، بین ۱۸۰ تا ۳۶۰ درجه چرخه قامه قرار دارد. (c) جمع توان چپ و راست در هر نقطه برابر با توان قامه است. Crank angle : زاویهٔ قامه Power: توان

سهم عضلات در توان پدال

توان پدال در نهایت توسط عضلاتی تولید می‌شود که در محدوده مچ، لگن و زانو گسترش یافته‌اند. با استفاده از تکنیک‌های مدل‌سازی و تحلیل بیومکانیکی می‌توانیم توان عضلات خم کننده[۴] و بازکننده[۵] این مفاصل را نیز محاسبه کنیم (به عبارتی توان عملکردی مفصل). شکل ۵,۳ توان مفاصل را در دوران کامل قامه نشان می‌دهد. بخش اعظم توان توسط بازکننده های لگن و زانو و خم کننده های کف پا ایجاد می‌شود. میزان بسیار کمی از این توان توسط خم کننده های زانو و لگن و خم کننده های مچ پا[۶](به سمت جلوی ساق) تولید می‌شود.

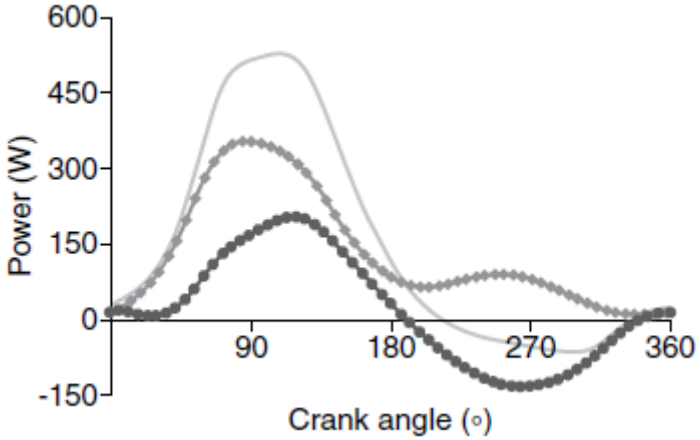
عملکرد اصلی بازکننده های لگن و زانو، تولید توانی است که نهایتاً به پدال انتقال می‌یابد. توجه داشته باشید که خم کننده های کف پا (عضلات ساق پا) دو عملکرد دارند. در کنار تولید مستقیم توان پدال، این خم کننده های کف پا، مفصل مچ را سفت می‌کنند که توان تولیدی توسط بازکننده های لگن و زانو به شکلی موثر به پدال منتقل شود. ساده‌ترین راه برای ترسیم این ساز و کار، تصور چگونگی عملکرد پا در صورت عدم فعالیت عضلات اطراف مچ و عدم استحکام مفصل مچ است.



[4] flexor
[5] extensor
[6] dorsiflexors

شکل ۵,۳ نمودارهای توان مفصل (**a**) لگن، (**b**) زانو و (**c**) مچ. توان بازکننده ها معمولاً بزرگتر از خم کننده ها هستند. توان خم کننده کف پا دیرتر از توان بازکننده لگن و زانو در چرخش قامه تولید می شود.

در این زمینه، در طی باز شدن پا، توان تولیدی توسط بازکننده های زانو و لگن صرفاً موجب درسی‌فلکشن[۷] مچ می‌شوند (که به معنی قرارگیری پا در موقعیتی با پاشنه پایین و پنجه بالا خواهد بود) و زانو فوق کشیده[۸] خواهد بود. بازکننده های زانو و لگن در این زمینه، پاها را در موقعیتی غیرفیزیولوژیکی شتاب می‌دهند و توان عملکردی مفاصل به شکلی موثر به پدال منتقل نخواهد شد. مشارکت نسبی توان عملکردی مفصل در توان پدال، بستگی به نیروی خارجی دوچرخه‌سواری دارد. به طور ویژه، مشارکت خم کننده مربوط به زانو، با بالا رفتن توان خارجی مورد نیاز افزایش پیدا می‌کند، که در بخش تغییر تکنیک رکاب‌زنی با جزئیات مورد بحث قرار گرفته است. توجه داشته باشید که توان اندازه‌گیری شده بر روی پدال، نه تنها عضلانی بوده بلکه شامل تاثیرات غیرعضلانی هم است. توان غیرعضلانی نتیجه جاذبه و نیروهایی است که وابسته به حرکت دانسته می‌شوند (برای مثال مایل به مرکز[۹] و گریز از مرکز[۱۰]). شکل ۵,۴ رابطه میان توان عضلانی (مجموع توان های زانو، مچ و لگن)، توان غیرعضلانی و توان کلی پدال را مشخص می‌کند (جمع دو مورد قبلی).



شکل ۵,۴ تقسیم توان پدال (خط ممتد) به بخش‌های عضلانی (نقاط مربع توپر) و غیرعضلانی (دایره‌های توپر). توان غیرعضلانی در طول ضربات رو به پایین مثبت است که این یعنی در این مرحله به تولید توان کمک می‌کند. در طول ضربات رو به بالا، توان غیرعضلانی منفی است یعنی در مقابل حرکت عمل کرده و در این مرحله از چرخه قامه، انرژی مصرف می‌کند. توجه داشته باشید که با وجود منفی بودن توان پدال در ضربات بالا، توان عضلانی در کل چرخه قامه مثبت باقی می‌ماند.

---

[7] dorsiflex
[8] hyperextend
[9] centripetal
[10] centrifugal

یکی از راه‌های ساده ترسیم این مفهوم، این است که تصور کنیم اسکلت بدن به دوچرخه متصل است و سپس در سرپایینی به سوی پایین هل داده می‌شود. در این سناریو، پاها نیرویی تولید می‌کنند که پدال را هدف گرفته و به دلیل حرکت و جاذبه به صورت غالب بر روی پدال به سمت پایین نیرو وارد می‌شود. از همین رو، نیروی پدال (و در پی آن توان) در طول مرحلهٔ باز شدن پا مثبت بوده و در خم شدن منفی است و این موضوع در شکل ۵,۴ قابل مشاهده است. هنگام تفسیر میزان توان پدال، این تاثیرات غیرعضلانی را نیز در نظر داشته باشید. به طور ویژه، مقدار منفی توان پدال (شکل ۵,۲ a وb) معمولاً منفی یا غیرکارآمد دانسته می‌شود. تقسیم توان پدال به بخش‌های عضلانی و غیرعضلانی نشان می‌دهد که محتویات عضلانی در طول چرخه قامه مثبت باقی می‌ماند. فاز منفی توان پدال به این معنی است که تولید نیروی کششی رو به بالا توسط عضلات خم کننده پا، کمتر از تولید نیروی رو به پایین توسط جاذبه و پا است، نیرویی که به هیچ عنوان ناکارآمد نیست.

اندام‌های فوقانی نیز در رکاب‌زدن نقش دارند. در طی مراحل زیربیشینه دوچرخه‌سواری با میزان توان کم، توان عضلانی تقریباً به شکلی منحصر توسط عضلات اندام‌های تحتانی تولید می‌شود. اما اگر میزان توان مورد نیاز بیشتر شود یا عضلات اندام‌های تحتانی کوفته شوند، عضلات بالاتنه در طول رکاب زدن فعال می‌شوند. توان حاصل، به مفصل لگن منتقل شده و با عبور از پا، مشارکت بیشتری را در توان پدال خواهد داشت. فعال‌سازی عضلات طوری برنامه‌ریزی می‌شود که بخش اعظم توان بالاتنه در مرحلهٔ باز شدن پا اتفاق بیفتد. این مشارکت بالاتنه را می توان در هنگام تلاش ورزشکاران برای تولید توان بالا و این طرف و آن طرف بردن تنه مشاهده کرد. تحلیل فعالیت الکتریکی عضله (الکترومایوگرافی یا EMG)، دیدگاه بهتر و دقیق‌تری از ساز و کارهای تولید توان عضلانی و رسیدن آن به قامه را به دست می‌دهد (هاگ و دورل ۲۰۰۹ و سو، جوزف و گابریل ۲۰۰۵ را برای مرور ببینید).

پیش از ورود به جزئیات بحث، باید خاطرنشان کنیم که عضلات بیش از همه چیز، در طول دوچرخه‌سواری برای تولید نیرو اهمیت دارند. بزرگترین و قوی‌ترین عضله بازکنندهٔ لگن، سرینی بزرگ[11] است است. مهم‌ترین عضله بازکنندهٔ زانو چهار سر زانو[12] است، که از چهار عضله ساخته شده (پهن بیرونی، پهن درونی، پهن میانی و راست رانی). مهم‌ترین خم کننده های کف پا (عضلات ساق) عضلات دوقلو[13] و نعلی[14] هستند. مهم‌ترین خم کننده های زانو در دوچرخه‌سواری، همسترینگ‌ها هستند (دوسر ران، نیم غشایی، و نیم وتری). برای انتقال توان عضلانی به پدال به نحوی موثر، عضلات باید در فواصل زمانی، فعال و غیرفعال شوند. به دلیل تاخیر میان فعالسازی عضله و تولید نیرو در آن (که به نام *تاخیر الکترومکانیکی* شناخته می‌شود)، عضلات باید به نرمی

[11] gluteus maximus
[12] quadriceps femoris
[13] gastrocnemius
[14] soleus

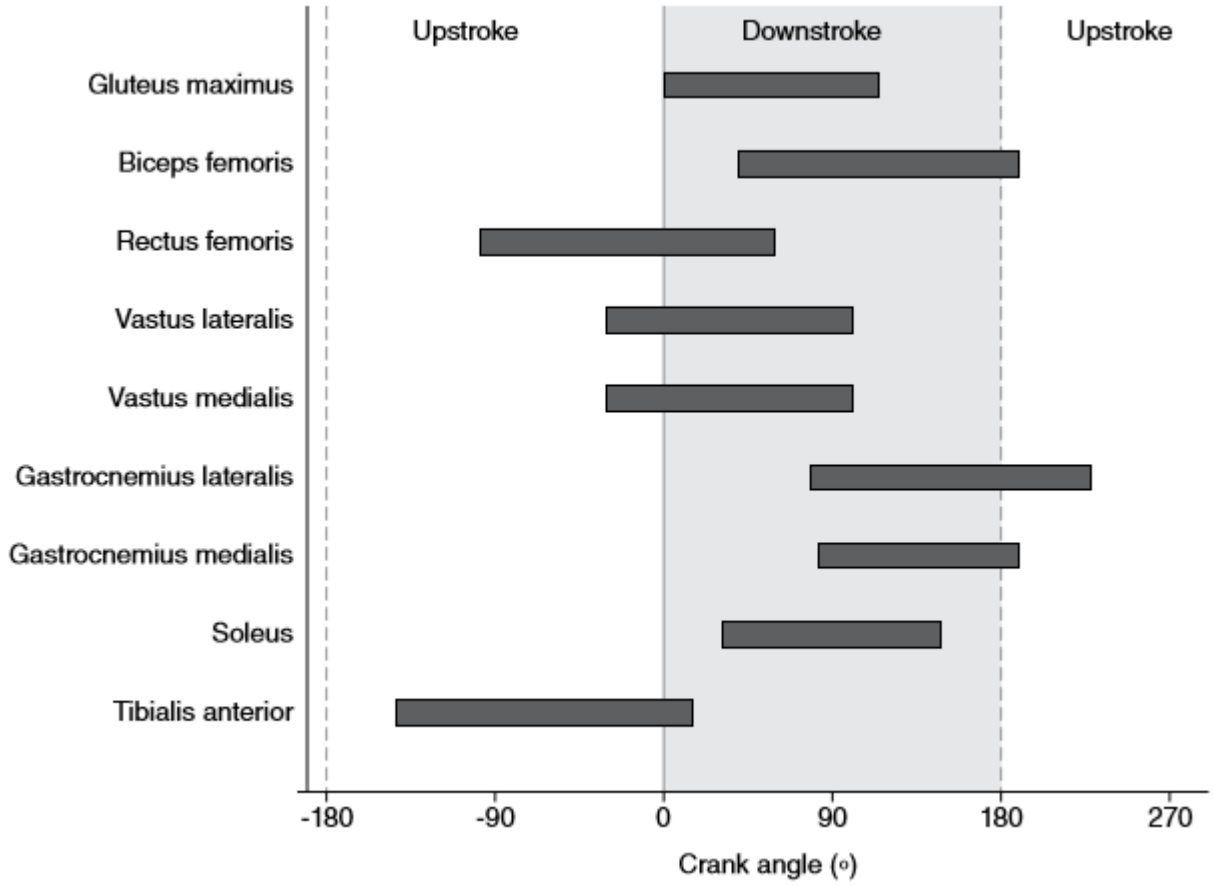
پیش از تولید نیرو فعال شوند. برای مثال بازکننده های زانو، پهن درونی (VM)[15] و پهن بیرونی (VL)[16] برای تولید حداکثر نیرو در حدود ۹۰ درجه از گردش قامه مورد نیاز هستند. برای این که این اتفاق بیافتد، این عضلات باید حتی پیش از رسیدن پدال به بالاترین نقطه (TDC)[17] ، فعال شده باشند.

به طور مشابهی، سرینی بزرگ پیش از TDC شروع به فعالیت کرده و در بیشتر زمان ضربه (رو به پایین) نیز فعال می‌ماند. خم کننده های کف پا (دوقلو داخلی، دوقلو بیرونی و نعلی) بعداً در چرخه فعال می‌شوند. این موضوع در شکل ۵,۳ به خوبی نشان داده شده است، در این مرحله توان مچ در چرخه (کمی بعد از زانو و لگن) بالا می‌رود. عضله درشت نی قدامی (مهم‌ترین خم کننده کف پا)، در میان راه رو به بالا فعال می‌شود تا بتواند نیرو را از طریق انتقال از مرکز بالا تولید کند. به طور مشابهی، خم کننده های زانو در مرحله بعدِ رو به پایین، جهت انتقال پدال از طریق مرکز پایین چرخه برای تولید میزان کمی از توان خمیدگی در ضربه رو به بالا فعال می‌شوند. مدت فعالیت گردش قامه در تمام عضلات تولیدکننده نیرو در شکل ۵,۵ دیده می‌شود. با انجام تحلیل مکانیکی عملکرد دوچرخه‌سواری یا تکنیک رکاب زدن، این قوانین پایه‌ایِ مکانیکی و آناتومیک باید در نظر گرفته شوند.

توان پدال، مصرف انرژی متابولیک، و کارآمدی

برای تولید توان مکانیکی، عضلات باید نیرو تولید کنند که این تولید نیرو نیازمند انرژی متابولیک است (فصل ۲ را ببینید). مصرف انرژی عاملی مهم در بستر عملکرد دوچرخه‌سواری است. از یک دیدگاه بیومکانیکی، توان پدال مهم‌ترین عامل تایین‌کننده مصرف انرژی متابولیک است (مک دنیل و دیگران ۲۰۰۲). اما انرژی متابولیک مصرفی توسط عضلات (انرژی ورودی) همیشه بیشتر از انرژی تحویل شده به دوچرخه (انرژی خروجی) است. به دلیل پیچیدگی آناتومیک حرکات دوچرخه‌سواری، توان عضلانی همیشه بیشتر از توان قامه است.

[15] vastus medialis
[16] vastus lateralis
[17] top dead center



شکل ۵,۵ مراحل فعالیت عضلانی در طول چرخه قامه

ضریب معمول ۵:۱ است. به عبارت دیگر، کارآمدی دوچرخه‌سواری تقریباً ۲۰٪ است حتی در دوچرخه‌سوارانی با سطح تمرین بسیار بالا (کویل و دیگران ۱۹۹۲). در موارد توان پایین‌تر، انرژی متابولیک به طور غالب از طریق مسیرهای انرژی هوازی تولید می‌شود. در توان‌های بالاتر، مسیرهای غیرهوازی مهم‌تر خواهند بود. منابع تولید نیروی عضلانی از طریق غیرهوازی محدود هستند که این خود به معنی کوفتگی سریع‌تر در صورت مصرف منابع انرژی غیرهوازی است. آستانه لاکتات، بالاترین توانی است که دوچرخه سوار می‌تواند در حالت پایدار با استفاده از مسیرهای انرژی هوازی رکاب بزند. هرچه آستانه لاکتات بالاتر باشد، دوچرخه‌سوار توانایی تولید توان عضلانی بیشتری را بدون کوفتگی دارد. همان طور که در این فصل خواهیم دید، این قوانین علمی باید هنگام تفسیر و اندازه‌گیری متغیرهای مکانیکی در طی دوچرخه‌سواری، در نظر قرار گیرند.

گردآورنده و مترجم

میلاد پیراللهی

دانشجوی دکتری فیزیولوژی ورزش دانشگاه شهید بهشتی

برگرفته از کتاب علم دوچرخه سواری