Biomechanika

Od grec. słowa mechane - narzędzie; dyscyplina naukowa zajmująca się organizmami żywymi traktowanymi jako narzędzia o określonych funkcjach mechanicznych.

Biomechanika bada właściwości mechaniczne tkanek, narządów, układów oraz ruch mechaniczny żywych organizmów — jego przyczyny i skutki. Przyczynami ruchu są siły zewnętrzne (np. siła ciężkości) i wewnętrzne (zwłaszcza mięśniowe). Skutkiem jest zmiana położenia ciała własnego lub obcego albo naprężenia i odkształcenia ciała.

Cybernetyka – nauka o systemach sterowania oraz związanym z tym przetwarzaniu i przekazywaniu informacji (komunikacja).

Kinematyka – dział mechaniki zajmujący się matematycznym opisem układów mechanicznych oraz badaniem geometrycznych właściwości ruchu. Kinematyka abstrahuje od działających sił i bezwładności ciała.

„Przedmiotem biomechaniki jest badanie przyczyn oraz skutków działania sił zewnętrznych i wewnętrznych na układ biologiczny, a w szczególności na człowieka. Biomechanika jest interdyscyplinarną dziedziną nauki, której obszar badań leży na pograniczu nauk ścisłych (mechanika) i biologicznych (biologia medyczna).”

Dwa warunki statyki

1. suma sił = 0
2. suma momentów siły = 0

Ruch obrotowy – moment siły $M0 = r \times P$. Ruch postępowy – siła.

Układ ruchu

Pojęcia kinematyczne

1. Człon – kość (element, który nie zmienia swoich wymiarów geometrycznych pod wpływem siły).
2. Para biokinematyczna – połączenie dwóch członów (musi być co najmniej 2 pary, wtedy powstanie 3 człon).

Kiedy są co najmniej 3 człony (2 pary biokinematyczne), wtedy powstaje łańcuch biokinematyczny.

- Łańcuch biokinematyczny zamknięty – nie ma członu wolnego; ruch w jednym przegubie wymusza ruch w pozostałych stawach (przykładowo 4 człony).
- Łańcuch biokinematyczny otwarty – posiada człon wolny (np. kończyna dolna – niezależny ruch), nie wymusza ruchów innego przegubu (3 człony); łańcuch wykonuje ruch (np. kończyna górna, kończyna dolna).

Ruchliwość

- Stopnie swobody – możliwość wykonywania ruchu (6 stopni swobody = 3 postępowe, 3 obrotowe).
- Więzy – ograniczenia możliwości ruchu (np. w stawie biodrowym brak ruchów postępowych).
- Klasy połączeń stawowych – ilość więzów mówi o klasie połączenia.
- Zakres ruchów pary biokinematycznej – bierny zawsze większy od czynnego.
- Ruch obrotowy – droga kątowa (dotyczy tylko ruchu obrotowego).
- Ruch postępowy – przemieszczenie liniowe.
- Biomechanizm – podstawa + łańcuch biokinematyczny; ćwiczenia w pozycjach izolowanych.
- Biomechanizm chwilowy – zmienna podstawa, zmienny łańcuch biokinematyczny.

Czynność mięśni w biomechanizmie

- Antycypacyjna – czynność statyczna: Mz = Mw (stabilizacja zawsze przed funkcją ruchową).
- Ruchowa.

Funkcja dynamiczna czynności

- Koncentryczna (pokonująca).
- Ekscentryczna (hamująca) – istotna w łańcuchach kinematycznych.

Mięśnie antygrawitacyjne (mięśnie posturalne, przeciwciążeniowe). Choroba przeciążeniowa kręgosłupa (autor J. Stoddry) – podział na mięśnie toniczne i fazowe (mięśnie posturalne łatwiej ulegają przykurczom, mięśnie fazowe nie).

Energia potencjalna: Ep = m g h (dążenie do zmniejszenia zmiany do minimum).

Siły reakcji (wg III zasad dynamiki Newtona)

I zasada dynamiki (zasada bezwładności)

Jeżeli na ciało nie działa żadna siła lub działające siły się równoważą, to ciało pozostaje w spoczynku lub porusza się ruchem jednostajnym prostoliniowym.

II zasada dynamiki

Gdy siły działające na ciało nie równoważą się, ciało porusza się ruchem zmiennym. Kierunek i zwrot przyspieszenia są zgodne z kierunkiem wypadkowej siły. Wartość przyspieszenia ciała o masie m jest wprost proporcjonalna do wartości wypadkowej siły: F = m a. Ciało o większej masie pod działaniem takiej siły uzyskuje mniejsze przyspieszenie.

III zasada dynamiki (zasada akcji i reakcji)

Siły wzajemnego oddziaływania dwóch ciał mają takie same wartości i kierunek, przeciwny zwrot i różny punkt przyłożenia. Siły te nie równoważą się, ponieważ działają na różne ciała.

Obciążenia układu ruchu

- Zewnętrzne – głównie momenty siły ciężkości. Opory zewnętrzne – reakcja podłoża oraz inne siły bezwładności.
- Wewnętrzne – mięśniowe.

Wektor siły mięśniowej i jego składowe: składowa obrotowa generuje ruch, składowa styczna powoduje nacisk na staw. Biomechanizm – czynność mięśni w biomechanice.

Reakcje więzów w stawach

Metody i techniki oceny siły mięśniowej

Nie można bezpośrednio zmierzyć siły mięśniowej; można pośrednio ocenić jej efekty przez zmianę momentu siły zewnętrznej na podstawie wyników badania. Metody:

- Metoda wolitywna (testy siły czynnej).
- Stymulacja (elektryczna) – ocena funkcji włókien mięśniowych.

Zasady pomiaru momentu siły mięśni w statyce

- Elektromiografia (EMG) – badanie potencjałów elektrycznych podczas skurczów włókien mięśniowych (powierzchniowa i igłowa; EMG powierzchniowe daje globalny obraz aktywacji, igłowa pozwala na ocenę pojedynczych jednostek motorycznych).
- Interferencja sygnału (wiek IR) i metoda igłowa do badania wybranych jednostek motorycznych.

Siła mięśnia w funkcji jego długości

Zakres skracania i wydłużania sarkomeru jest ograniczony; siła F wyzwalana przez pobudzony sarkomer jest funkcją jego długości F = f(I). Maksymalna siła pojedynczego włókienka występuje przy długości sarkomeru ok. 2–2,25 µm. Siła maleje przy nadmiernym rozciągnięciu lub skróceniu (gdy nitki miozyny dochodzą do linii Z).

Przyjmuje się długość spoczynkową I0 ≈ 2,25 µm. Przy rozciągnięciu do ok. 3,65 µm (≈ 162% długości spoczynkowej) siła spada do zera. Maksymalnie skrócony sarkomer ma wymiary ok. 1,27 µm (może skrócić się o ~44%), wtedy siła także spada do zera.

Mięsień ma elementy czynne (elementy kurczliwe — EK) oraz bierne (równoległe elementy sprężyste — RES i szeregowe elementy sprężyste — SES). W modelu mięśnia wyróżnia się EK, RES i SES; właściwości sprężyste elementów biernych wpływają na przenoszenie siły na kość.

Parametry biomechaniczne układu ruchu człowieka

Płaszczyzny i osie

1. Płaszczyzna strzałkowa

- Oś strzałkowa i pionowa.
- Dzieli ciało na część prawą i lewą; kończyny na część boczną i przyśrodkową.
- Ruchy: zginanie i prostowanie.
- Jest płaszczyzną symetrii (pośrodkową).

2. Płaszczyzna czołowa

- Oś poprzeczna i pionowa.
- Dzieli tułów, głowę i kończyny dolne na część przednią i tylną; kończyny górne na

część dłoniową i grzbietową.
- Ruchy: odwodzenie, przywodzenie; tułowia i głowy — zginanie w bok.

3. Płaszczyzna poprzeczna

- Oś strzałkowa i poprzeczna.
- Dzieli tułów i głowę na część dolną i górną; kończyny na część dystalną i proksymalną.
- Ruchy: nawracanie, odwracanie; tułowia — skręty.

Układ odniesienia nie związany z ziemią jest układem nieinercjalnym. Masa to ilość materii — wielkość skalarna. Ciężar to siła $Q = m\,g$ [N], gdzie $g \approx 9{,}81$ m/s^2. Siła jest wielkością wektorową: $F = m\,a$.

Cechy wektora

- Kierunek — prosta, na której leży wektor.
- Zwrot — jedna z dwóch możliwości na danym kierunku.
- Wartość — długość wektora (moduł).
- Punkt przyłożenia — miejsce, w którym wektor przyczepia się do ciała.

Wektor ciężkości

- Kierunek zawsze pionowy (góra–dół).
- Zwrot zawsze w dół.
- Wartość uzależniona od masy poszczególnych części ciała.
- Punkt przyłożenia — środek ciężkości.

Ruch postępowy wywołany jest niezrównoważoną siłą. Ruch obrotowy — momentem siły. Moment siły (ramię działania siły) to najkrótsza odległość od osi obrotu do kierunku działania siły.

Parametry strukturalne układu ruchu człowieka

Człon — sztywny element ciała ludzkiego (kości bez tkanek miękkich). Człon jest podstawową jednostką strukturalną mechanizmu lub biomechanizmu.

- Półpara — człon przystosowany do połączenia z innymi członami (powierzchnia stawowa).
- Para kinematyczna — ruchome połączenie dwóch półpar swobodnych.
- Łańcuch kinematyczny lub biokinematyczny — spójny układ członów połączonych

ruchomo.
- Mechanizm lub biomechanizm — podstawa (człon nieruchomy) plus łańcuch kinematyczny wykonujący określone ruchy.

Stopnie swobody

Człon w przestrzeni określają trzy punkty ABC o 9 współrzędnych. Dla ciała sztywnego odległości między punktami nie zmieniają się, dlatego pozostaje 6 niezależnych parametrów — 6 stopni swobody: 3 ruchy postępowe i 3 obrotowe.

Stopień swobody — ruch niezależny wykonany w jednym kierunku bez zmiany położenia względem innych kierunków. Wzór:

$H = 6 - s$

H — liczba stopni swobody pary (jednego członu względem drugiego przyjętego za nieruchomy). s — liczba więzów (przyjmuje wartości od 1 do 5). Jeśli s = 0, człon jest swobodny; s = 6 — połączenie nieruchome.

Klasy par biokinematycznych:

- Para III klasy (3 stopnie swobody): $H = 6 - 3 = 3$ (np. staw ramienny).
- Para IV klasy (2 stopnie swobody): $H = 6 - 4 = 2$ (np. staw promieniowo-nadgarstkowy).
- Para V klasy (1 stopień swobody): $H = 6 - 5 = 1$ (np. staw międzypaliczkowy).

Człowiek i zwierzęta wykonują zasadniczo ruchy obrotowe; stawy są kombinacją klas III, IV i V. Mięśnie działają jednostronnie — ciągną, nie pchają. Ruchliwość to liczba stopni swobody członów ruchomych mechanizmu względem podstawy.

Wzór na ruchliwość łańcucha biokinematycznego (W) zależy od liczby członów i klas par; w przykładach podano obliczenia dla człowieka: N = 144 człony, co daje W ≈ 240 stopni swobody względem czaszki. Każdy stopień swobody jest obsługiwany przez co najmniej dwa mięśnie (mięśnie antagonistyczne lub synergistyczne).

Teoria Hilla

Mięsień to przetwornik energii: energia chemiczna przekształcana jest w energię mechaniczną pod warunkiem pobudzenia mięśnia. Prędkość przemian energetycznych ograniczona jest m.in. przez nośniki energii (ATP), typ reakcji, masę mięśnia i

temperaturę.

Wynika z tego, że moc generowana przez mięsień ma wartość graniczną. Zależność siły od prędkości skracania opisał A. V. Hill równaniem charakterystycznym:

$(Fm + a)\ v = (Fmax - Fm)\ b$

lub

$(Fm + a)(v + b) = (Fmax + a)\ b = const.$

Gdzie:

- Fm — siła rozwijana przez mięsień przy prędkości v.
- a — stała charakterystyczna dla mięśnia (zależna m.in. od oporu wewnętrznego).
- b — stała zależna od właściwości mięśnia.
- Fmax — maksymalna siła przy v = 0 (skurcz izometryczny).

Krzywa Hilla przedstawia Fm = f(v): przecięcie z osią Fm przy v = 0 daje Fmax; przecięcie z osią v przy Fm = 0 daje Vmax — maksymalną prędkość skracania mięśnia. Moc (siła × prędkość) osiąga maksimum przy wartości prędkości bliskiej ~0,31 Vmax.

Chód

Chód charakteryzuje się cyklicznością i symetrią: naprzemiennymi ruchami kończyn górnych i dolnych.

Fazowość

Faza podporowa (FP) — około 60% cyklu. Faza wymachu (FW) — około 40% cyklu. Rytmiczność: FP : FW = 3 : 2.

a) Faza podporu [FP]

Kryteria: kontakt stóp z podłożem dzieli się na 3 podfazy:

1. FP1 — kontakt na pięcie (ok. 10% cyklu)
2. FP2 — podparcie płaskie na całej stopie (ok. 30% cyklu)
3. FP3 — podparcie na przedstopiu i palcach (ok. 20% cyklu)

b) Faza wymachu [FW]

Kryteria: zmiana przyspieszenia kończyny wymachowej dzieli fazę na 3 podfazy:

1. FW1 — przyspieszenie (ok. 13% cyklu) — głównie zginanie stawu biodrowego.
2. FW2 — przeniesienie (ok. 17% cyklu) — faza bierna: moment siły bezwładności.
3. FW3 — hamowanie (ok. 10% cyklu) — czynne: prostowniki stawu biodrowego i zginacze stawu kolanowego.

Okres podwójnego podparcia występuje przy przejściu z jednej kończyny podporowej na drugą; to trudny manewr ze względu na chwilową zmianę płaszczyzny podparcia i zmniejszoną stateczność.

Charakterystyka sił pionowych i bocznych podczas chodu

- "L tylny" (P1/P2) — pierwsze dociążenie pięty: wartość około 100% ciężaru ciała.
- "L przedni" (P2/P3) — drugie dociążenie przodostopia: wartość około 120–140% ciężaru ciała.
- "Siednisko" (P2) — odciążenie podłoża związane z dynamiką wymachu kończyny przeciwnej: wartość około 60–80% ciężaru ciała.

Składowa Y boczna: przyśrodkowo (+Y) — tendencje przywiedzeniowe; bocznie (−Y) — tendencje odwiedzeniowe.

Bieg

Sprinterzy osiągają prędkości do około 10 m/s, maratończycy ok. 5,5 m/s podczas długotrwałego biegu.

W biegu występuje faza podporu na jednej nodze i faza lotu; nie występuje faza podwójnego podparcia jak w chodzie. Faza podporu dzieli się na amortyzację i odbicie; faza lotu na wznoszenie i opadanie.

Podział faz ruchowych:

1. Faza amortyzacji
2. Faza odbicia
3. Tylni wymach
4. Przedni wymach

Prędkość biegu v jest iloczynem długości kroku l i częstotliwości kroku f:

V = l × f

Długość kroku jako funkcja długości nóg i prędkości biegu może być opisana zależnością regresyjną:

L = a × log v

gdzie a to współczynnik charakterystyczny krzywej regresji (wartości około 2–2,5).

Obciążenia w praktyce treningowej

Składowe obciążenia ćwiczeń:

- Intensywność ćwiczenia (moc włożona).
- Czas trwania ćwiczenia — decyduje o wykonanej pracy (Nw × tćw = Lw).
- Czas trwania przerwy odpoczynkowej — wpływa na powrót zdolności do pracy (N = f(fodp)).
- Charakter odpoczynku — bierny lub czynny (czynny przyspiesza regenerację poprzez zwiększenie przepływu krwi).
- Liczba powtórzeń i serii — decyduje o łącznej pracy wykonanej w treningu.

Podstawowe metody treningu cech fizycznych przedstawiono tabelarycznie poniżej.

Metoda	Max obciążeń	Min obciążeń	Max powtórzeń	Izometryczna	Ciągła	Powtórzeniowa	Interwałowa
Intensywność	E = max	a = max	W = średnie	m > max, V = 0	N = mała	K = max, N = sub max	U = duża
Czas (min)	2–6	5–15	20–40	4–6	Powyżej	5–20	40–90
Ćwiczenia (s)					90, 4–120		
Czas odpoczynku (min)	3–5	6–8	10–15	2–4	brak	8–10	1–3
Charakter odpoczynku	mało aktywny	mało aktywny	czynny	czynny	brak	mało aktywny	czynny

Postawa ciała

Postawa ciała — odruchowy sposób utrzymania równowagi ciała w pozycji stojącej ("pionizowanej").

Postawa idealna:

- jest stabilna;
- wyprostowana z utrzymaniem masy ciała nad płaszczyzną podparcia;
- minimalizuje obciążenia i napięcia tkanek;
- minimalizuje wydatek energetyczny (w spoczynku — statyczna, w ruchu — dynamiczna).

Czynności kręgosłupa w biomechanice

1. Kręgosłup jako łańcuch biokinematyczny względem podstawy – miednicy i kończyn dolnych.
2. Kręgosłup jako podstawa dla czynności łańcuchów biokinematycznych kończyn górnych i obręczy barkowej.

Czynności mięśnia w biomechanizmie

1. Statyczna (antycypacyjna) — mięśnie ustalają człony podstawy biomechanicznej, likwidując zbędne stopnie swobody.
2. Koncentryczna/ekscentryczna — przemieszczają łańcuch biokinematyczny.

Założenia biomechaniki postawy: do każdej części ciała przyłożony jest wektor siły ciężkości, wektory te działają na ramionach względem osi obrotu w stawach, powstają momenty sił ciężkości dążące do przemieszczenia masy; przeciwdziałają temu momenty sił mięśniowych zgodnie z równaniem [Mzew = Mwew] — równowaga decyduje o koordynacji nerwowo-mięśniowej.

Rozwój krzywizn kręgosłupa w kolejnych kwartałach życia: lordoza szyjna (I kwartał) — unoszenie głowy; kifoza piersiowa (II kwartał) — siadanie; lordoza lędźwiowa (III kwartał) — stanie; IV kwartał — chodzenie.

Stabilizacja stawów

Stabilizacja stawu skokowego

- Pion rzutuje się do przodu od osi stawu przez staw piętowo-sześcienny.
- Stabilizacja czynna: mięsień trójgłowy łydki, przede wszystkim brzuchaty łydki — zapobiega grzbietowemu zgięciu stawu skokowego.

Stabilizacja kolan

Pion rzutuje się do przodu osi stawu kolanowego na rzepkę.

a) Stabilizacja czynna

- m. trójgłowy łydki
- m. brzuchaty łydki
- m. kulszowo-goleniowy
- m. czworogłowy uda — zależnie od wychylenia ku przodowi

b) Stabilizacja bierna

- więzadła (m.in. więzadła krzyżowe)
- m. grupy tylnej uda — dwugłowy, półścięgnisty, półbłoniasty (wsparcie bierne i czynne)

Stabilizacja biodra, tułowia i głowy

Stabilizacja stawu biodrowego, tułowia i głowy zależy od położenia pionu względem osi stawów oraz od czynników czynnych (mięśnie) i biernych (więzadła).

Stabilizacja tułowia:

- czynna: prostowniki i zginacze tułowia (mięśnie grzbietu i brzucha)
- bierna: więzadła kręgosłupa

Stabilizacja głowy:

- czynna: mm. podpotyliczne
- bierna: więzadło karkowe

Wady postawy: przykładowe normy — kifoza piersiowa ok. 35°, lordoza lędźwiowa ok. 40°. Kąt ustawienia kości krzyżowej ~45°. Prawidłowy kąt pochylenia miednicy: mężczyźni ~31°, kobiety ~28°, dzieci (4 lata) ~22°; z wiekiem wartość ta rośnie.

Wady postawy

Wady postawy ciała mogą być spowodowane:

1. czynnikami wrodzonymi (np. dysplazja stawu biodrowego),
2. urazami lub chorobami,
3. nabytymi złymi nawykami ruchowymi — najpowszechniejsze.

Najwięcej wad postawy pojawia się około 6. roku życia (zmiana trybu życia) oraz w

okresie skoku pokwitaniowego (zmiana proporcji ciała i położenia środka masy).

Etapy rozwoju wady postawy:

1. I okres — zmiany czynnościowe
2. II okres — powstawanie przykurczy
3. III okres — zmiany strukturalne

Parametry masowe ciała człowieka

Punkt materialny — ciało o bardzo małych wymiarach, w którym skupiona jest masa. Ciężar ciała to siła wynikająca z przyciągania ziemskiego; masa jest wielkością skalarną.

	Braun i Fischer	Merles	Gempser	Zaciorski
Głowa	7%	7,6%	7,9%	6,9%
Tułów	43%	44,2%	48,6%	43,5%
Ramię	3%	3,1%	2,7%	2,7%
Przedramię	2%	1,7%	1,6%	1,6%
Ręka	1%	1,9%	0,6%	0,6%
Udo	12%	11%	9,7%	14,1%
Podudzie	5%	4,6%	4,6%	4,33%
Noga	2%	2,0%	1,4%	1,3%

Równanie regresji

X1 — ciężar ciała w kg; X2 — ciężar ciała w metrach. Przykładowa formuła dla głowy: 1,296 + 0,0171·X1 + 0,0143·X2.

Metoda wyznaczania ciężaru części ciała metodą bezpośrednią (najdokładniejsza) wykorzystuje dźwignię jednostronną (układ deska i waga). W praktyce stosuje się również metody pośrednie i zawieszania dla wyznaczenia położenia środka ciężkości (promień wodzący podawany w % długości danej części ciała).

Przykładowe promienie wodzące:

- Środek ciężkości głowy — okolica siodełka tureckiego (kość klinowa).
- Tułów — linia łącząca osie w stawach barkowych, ok. 44% długości osi ciała.
- Ramię — ok. 47% od osi obrotu w stawie ramiennym.
- Przedramię — ok. 42% od osi obrotu w stawie łokciowym.

- Dłoń — w okolicy głowy III kości śródręcza (ok. 1 cm proksymalnie i promieniowo).
- Udo — ok. 44% od osi obrotu w stawie biodrowym.
- Podudzie — ok. 42% od osi obrotu w stawie kolanowym.
- Stopa — ok. 44% od guza pierwszego do końca II palca.

Wyznaczanie środka ciężkości (OSC)

OSC (ogólny środek ciężkości ciała) to punkt przyłożenia wypadkowej sił ciężkości. Metody wyznaczania OSC:

1. Bezpośrednie — potrzeba badanego obiektu (np. metoda Borelliego lub duBois-Reymonda).
2. Pośrednie — analiza danych, zdjęć, filmów i obliczenia analityczne lub graficzne.

Metoda Borelliego

Z zastosowaniem dźwigni dwustronnej — w praktyce trudna ze względu na małą stateczność układu człowieka.

Metoda duBois–Reymonda (dźwignia jednostronna)

Badany układany jest na sztywnej płycie opartej w punkcie A; reakcję R mierzy waga. Z równowagi układu odczytuje się położenie środka ciężkości; pomiar trzeba wykonać w trzech płaszczyznach.

Metody pośrednie

Metoda analityczna — składanie momentów sił (twierdzenie Varignon): wypadkowy moment sił ciężkości układu sił równoległych względem dowolnego punktu jest równy sumie momentów sił składowych względem tego punktu.

Opis metody: przygotowanie zdjęcia badanego, naniesienie osi stawów i środków ciężkości poszczególnych części ciała, powiększenie, naklejenie na papier milimetrowy i wykonanie obliczeń.

Metoda graficzna

Wypadkowa dwóch sił równoległych leży na prostej łączącej punkty przyłożenia i dzieli odcinek odwrotnie proporcjonalnie do wartości sił. Środek ciężkości układu znajduje się na linii łączącej środki ciężkości poszczególnych mas.

Lp.	Q1 x1	y1	Q1 x1	Q1 y1
1	3	3 7	9	21
2	2	8 4	16	8
3	1	5 2	5	2
4	4	6 6	24	24
Suma	10		54	55

Pchnięcie kulą

Składowe elementy toru ruchu kuli: od przyjęcia pozycji w kole (A), doślizgu i momentu utraty kontaktu z ręką (B), aż do upadku na podłoże (C). Na etapie AB miotacz może wpływać na parametry ruchu kuli (długość drogi, czas trwania ruchu, prędkość, wysokość lotu). Po utracie kontaktu (BC) kula podlega prawom balistyki.

Miotacz dąży do nadania kuli maksymalnej prędkości i optymalnego kąta wylotu względem horyzontu. Zasięg rzutu zależy od prędkości wylotowej, kąta wylotu, wysokości wylotu h0 oraz warunków atmosferycznych i aerodynamiki kuli.

Optymalny kąt wylotu dla prostych modeli bez oporu powietrza to 45°, jednak w praktyce (przy wysokości wylotu, oporze aerodynamicznym i innych czynnikach) optymalny kąt jest zwykle mniejszy lub większy od 45°.

Prędkość wylotu (m/s)	12	12,5	13	13,5	14
Kąt wylotu ≈ 45°	16,59	17,95	19,27	20,67	22,05

Wyższa wysokość wylotu (h0) zwiększa zasięg przy tych samych prędkościach wylotu. Przykładowo: dla V0 = 12,5 m/s i h0 = 2,1 m zasięg może wynosić ~17,89 m; przy h0 = 2,3 m zasięg wzrasta do ~18,07 m (około +18 cm).

Dla pchnięcia kulą o masie m = 7,257 kg energia kinetyczna $E = 0,5\ m\ V0^2$. Przy V0 = 12,5 m/s $E \approx 0,5 \times 7,257 \times (12,5)^2 \approx 566$ J (wartość orientacyjna; w oryginalnym tekście podano inne przybliżenie — poprawiono objaśnienie). Jeśli droga działania siły miotacza l ≈ 1,5 m, średnia siła przyspieszająca Fp ≈ E / l. W praktyce siła miotacza i kierunek przyłożenia determinują efektywną składową przyspieszającą oraz kompensacyjną składową grawitacyjną Fk = R × sin(Beta).

Źródła i literatura: fragmenty oparte na materiałach z zakresu biomechaniki układu ruchu człowieka (Bober, Zawadzki) oraz klasycznych prac Hilla i opracowaniach praktycznych (Physiotherapy & Medicine).