

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Brno, 2021

Patrik Fabián



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV BIOMEDICÍNSKÉHO INŽENÝRSTVÍ

DEPARTMENT OF BIOMEDICAL ENGINEERING

VALIDACE PREDIKTIVNÍCH ROVNIC PRO URČENÍ KLIDOVÉHO ENERGETICKÉHO VÝDEJE

VALIDITY OF PREDICTIVE EQUATIONS FOR DETERMINING RESTING ENERGY EXPENDITURE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Patrik Fabián

VEDOUcí PRÁCE

SUPERVISOR

Mgr. Daniela Chlíbačková, Ph.D.

BRNO 2021

Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Biomedicínská technika a bioinformatika**

Ústav biomedicínského inženýrství

Student: Patrik Fabián

ID: 211678

Ročník: 3

Akademický rok: 2020/21

NÁZEV TÉMATU:

Validace prediktivních rovnic pro určení klidového energetického výdeje

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1) Shromáždit informace o klidovém a bazálním metabolismu (definice, způsoby měření). Zaměřit se na faktory, které mohou měření ovlivnit. Shromáždit dostupné prediktivní rovnice pro určení energetického klidového výdeje. 2) Provést měření nepřímé kalorimetrie v laboratoři CESA pod odborným dohledem a nashromáždit data pro komparaci. U testovaných osob vypočítat hodnoty klidového metabolismu pomocí prediktivních rovnic. 3) Vyhodnotit a porovnat navzájem predikční rovnice a výsledky ověřit z více hledisek včetně druhu proměnných a konstant, které do výpočtu vstupují. Vyhodnotit data získaná nepřímou kalorimetrií a výsledky porovnat s výsledky získanými predikčními rovnicemi a dalšími přístroji v laboratoři, které hodnotí klidový metabolismus. 4) Vytvořit vlastní postup pro predikci klidového energetického výdeje (například s využitím strojového učení). Analyzovat průběh jednotlivých měření detailně včetně všech proměnných a jejich časových křivek v daném naměřeném intervalu. 5) Zjistit, jak dalece ovlivňuje složení posledního jídla celkové výsledky měření a podíl hodnot jednotlivých nutrientů ve výsledné analýze měřeného intervalu. 6) Popsat souvislosti, které by pomohly stávající metodiku měření zdokonalit.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] TINSLEY GM, GRAYBEAL AJ, MOORE ML. Resting metabolic rate in muscular physique athletes: validity of existing methods and development of new prediction equations. *Appl Physiol Nutr Metab.* 2019;44(4):397-406.

[2] GALGANI JE, CASTRO-SEPULVEDA M, PÉREZ-LUCO C, FERNÁNDEZ-VERDEJO R. Validity of predictive equations for resting metabolic rate in healthy humans. *Clin Sci (Lond).* 2018;132(16):1741-1751. Published 2018 Aug 22.

Termín zadání: 8.2.2021

Termín odevzdání: 28.5.2021

Vedoucí práce: Mgr. Daniela Chlíbařová, Ph.D.

Konzultant: Ing. Marina Ronzhina, Ph.D.

doc. Ing. Jana Kolářová, Ph.D.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá validací prediktivních rovnic pro určení klidového energetického výdeje.

Cílem této bakalářské práce bylo srovnat jednotlivé prediktivní rovnice pro určení klidového energetického výdeje s vlastním měřením pomocí nepřímé kalorimetrie a stanovit vlastní postup pro predikci klidového energetického výdeje.

Vyhodnocení jednotlivých prediktivních rovnic probíhalo na základě statistických analýz. Na základě statistických analýz bylo zjištěno, že dostupné prediktivní rovnice podhodnocují klidový energetický výdej v průměru o 20 % kilokalorií za jeden den ve srovnání s měřenou hodnotou pomocí nepřímé kalorimetrie.

Pro stanovení vlastního postupu pro predikci klidového energetického výdeje bylo využito strojové učení, které potom bylo prezentováno pomocí uživatelského rozhraní. Následující testování ukázalo, že neuronová síť pro predikci klidového energetického výdeje poskytuje ve srovnání s dostupnými prediktivními rovnicemi přesnější výsledky.

Klíčová slova

Klidový energetický výdej, nepřímá kalorimetrie, prediktivní rovnice pro určení klidového energetického výdeje, strojové učení

Abstract

This bachelor thesis deals with the validation of predictive equations to determine resting metabolic rate.

The objective of this bachelor thesis was to compare individual predictive equations for determining resting metabolic rate with self-measurement using indirect calorimetry and to establish a own procedure for predicting resting metabolic rate.

The evaluation of each predictive equation was based on statistical analyses. Based on statistical analyses, it was found that the available predictive equations underestimate resting metabolism by an average of 20 % of kilocalories per day compared to the value measured by indirect calorimetry.

Machine learning was used to determine the actual procedure for predicting resting metabolic rate, which was then presented using the user interface. The following testing showed that the neural network for predicting resting metabolic rate provides more accurate results compared to the available predictive equations.

Keywords

Resting energy expenditure, indirect calorimetry, predictive equations for determining resting energy expenditure, machine learning

Bibliografická citace

FABIÁN, Patrik. *Validace prediktivních rovnic pro určení klidového energetického výdeje*. Brno, 2021. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/134369>.
Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav biomedicínského inženýrství. Vedoucí práce Daniela Chlíbařová.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení studenta: *Patrik Fabián*

VUT ID studenta: *211678*

Typ práce: *Bakalářská práce*

Akademický rok: *2020/21*

Téma závěrečné práce: *Validace prediktivních rovnic pro určení klidového energetického výdeje*

Prohlašuji, že svoji bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí bakalářské práce s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne:

podpis

Poděkování

Děkuji vedoucí bakalářské práce Mgr. Daniele Chlíbkové, Ph.D. a konzultantce bakalářské práce Ing. Marině Ronzhině, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne: 28. května 2021

podpis autora

Obsah

SEZNAM OBRÁZKŮ.....	9
SEZNAM TABULEK	10
ÚVOD.....	11
1. TEORETICKÁ ČÁST	12
1.1 METABOLISMUS.....	12
1.1.1 <i>Metabolické poruchy – nemoci spojené s metabolismem</i>	13
1.2 CELKOVÝ ENERGETICKÝ VÝDEJ	14
1.2.1 <i>Bazální metabolismus</i>	14
1.2.2 <i>Klidový metabolismus</i>	14
1.2.3 <i>Termický efekt potravy</i>	14
1.2.4 <i>Energetický výdej při pohybové aktivitě</i>	15
1.2.5 <i>Faktory ovlivňující celkový energetický výdej</i>	16
1.3 METODY MĚŘENÍ ENERGETICKÉHO KLIDOVÉHO VÝDEJE	18
1.3.1 <i>Nepřímá kalorimetrie</i>	19
1.3.2 <i>Přenosný nepřímý kalorimetr – Fitmate GS</i>	22
1.3.3 <i>Další metody měření klidového energetického výdeje</i>	23
1.4 PŘEHLED PREDIKTIVNÍCH ROVNIC PRO URČENÍ KLIDOVÉHO ENERGETICKÉHO VÝDEJE	26
2. PRAKTICKÁ ČÁST.....	37
2.1 CÍLE PRÁCE.....	37
2.2 METODIKA	38
2.2.1 <i>Postup měření</i>	38
2.2.2 <i>Výzkumný soubor</i>	39
2.2.3 <i>Statistická analýza</i>	39
2.3 POPIS DATOVÉHO SOUBORU	40
2.4 VLIV POHLAVÍ NA KLIDOVÝ ENERGETICKÝ VÝDEJ	42
2.5 SROVNÁNÍ PREDIKTIVNÍCH ROVNIC S MĚŘENÍM KLIDOVÉHO ENERGETICKÉHO VÝDEJE POMOCÍ NEPŘÍMÉ KALORIMETRIE.....	44
2.5.1 <i>Procentuální srovnání prediktivních rovnic s nepřímou kalorimetrií</i>	44
2.5.2 <i>Korelační analýza a regresní vztahy</i>	46
2.5.3 <i>Dvouvýběrový párový Studentův test</i>	48
2.5.4 <i>Bland-Altmanův graf</i>	50
2.6 ODVOZENÍ VLASTNÍHO POSTUPU PRO PREDIKCI KLIDOVÉHO ENERGETICKÉHO VÝDEJE	54
2.6.1 <i>Odvození vlastní rovnice pro predikci klidového energetického výdeje</i>	54
2.6.2 <i>Neuronová síť pro predikci klidového energetického výdeje</i>	57
2.7 DISKUSE A ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ	62
3. ZÁVĚR.....	66
LITERATURA.....	67
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	72
SEZNAM PŘÍLOH.....	73

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1.1 : Schéma přeměny základních živin, převzato [2]	12
Obrázek 1.2 Schéma principu nepřímé kalorimetrie, převzato [10]	19
Obrázek 1.3 Nepřímá kalorimetrie – otevřený systém s mísicí komorou pro měření pacientů na umělé ventilaci, převzato [10]	20
Obrázek 1.4 Nepřímá kalorimetrie – otevřený systém měření pomocí canopy u spontánně ventilujícího pacienta, převzato [10]	20
Obrázek 1.5 Přenosný nepřímý kalorimetr Fitmate GS, převzato [39]	22
Obrázek 1.6 Schematicky znázorněný princip přímé kalorimetrie, převzato [15]	23
Obrázek 1.7 Přístroj InBody 770, převzato [40]	24
Obrázek 1.8 Pokles hladin 2 H a 18 O v celkové tělesné vodě během měření, převzato [37]	25
Obrázek 2.1 Grafické znázornění vysvětlující vliv pohlaví na RMR zohledňující věk	43
Obrázek 2.2 Bland-Altmanův graf pro nepřímou kalorimetrii a Korthovu rovnici (s nejmenším vychýlením)	52
Obrázek 2.3 Bland-Altmanův graf pro nepřímou kalorimetrii a Bernsteinovu rovnici s FFM 2 (s největším vychýlením)	52
Obrázek 2.4 Graf zobrazující 95 % intervaly spolehlivosti pro rozdíl mezi hodnotami RMR získanými nepřímou kalorimetrií a jednotlivými prediktivními rovnicemi	53
Obrázek 2.5 Znázornění topologie vícevrstvé neuronové sítě, převzato [54]	57
Obrázek 2.6 Topologie neuronové sítě	58
Obrázek 2.7 Regresní graf zobrazující skutečné hodnoty RMR ve vztahu s predikovanými hodnotami RMR neuronovou sítí na trénovacích datech	60
Obrázek 2.8 Uživatelské rozhraní sloužící k výpočtu RMR	61

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1.1 Rozdělení typů poruch metabolismu.....	13
Tabulka 1.2 Faktory aktivity stanovené na základě typu pohybové aktivity, převzato [4]	15
Tabulka 1.3 Spotřeba O ₂ , výdej CO ₂ a tvorba energie z energetických substrátů, převzato [10].....	21
Tabulka 1.4 Podmínky nepřímé kalorimetrie pro Bernsteinovu studii, převzato [33].....	28
Tabulka 1.5 Podmínky nepřímé kalorimetrie pro Mifflinovu studii, převzato [33]	28
Tabulka 1.6 Podmínky nepřímé kalorimetrie pro Owenovu studii, převzato [33]	29
Tabulka 1.7 Podmínky nepřímé kalorimetrie pro Livingstonovu studii, převzato [33].....	30
Tabulka 1.8 Podmínky nepřímé kalorimetrie pro Müllerovu studii, převzato [33].....	33
Tabulka 1.9 Podmínky nepřímé kalorimetrie pro Korthovu studii, převzato [33]	33
Tabulka 1.10 Podmínky nepřímé kalorimetrie pro De Lorenzovu studii, převzato [33]	34
Tabulka 1.11 Podmínky nepřímé kalorimetrie pro Lazzerovu studii, převzato [33]	35
Tabulka 1.12 Podmínky nepřímé kalorimetrie pro Huangovu studii, převzato [33]	35
Tabulka 1.13 Podmínky nepřímé kalorimetrie pro Johnstoneovu studii, převzato [33]	36
Tabulka 2.1 Analýza tělesného složení u měřené skupiny	40
Tabulka 2.2 Vypočítané hodnoty klidového energetického výdeje.....	41
Tabulka 2.3 Vliv tělesných parametrů na výslednou hodnotu RMR predikovanou danou rovnicí	44
Tabulka 2.4 Procentuální srovnání prediktivních rovnic s metodou nepřímé kalorimetrie.....	45
Tabulka 2.5 Korelační koeficienty a regresní vztahy	47
Tabulka 2.6 Výsledky srovnání predikovaných hodnot RMR (rovnice) a měřených hodnot RMR (nepřímá kalorimetrie) s použitím dvouvýběrového párového Studentova testu (T představuje hodnotu testovacího kritéria)	49
Tabulka 2.7 Rozdíly mezi predikovanými RMR a měřenými RMR	51
Tabulka 2.8 Výsledky prvního iterativního kroku při budování modelu pro predikci RMR	55
Tabulka 2.9 Výsledky druhého iterativního kroku při budování modelu pro predikci RMR.....	55
Tabulka 2.10 Výsledky třetího iterativního kroku při budování modelu pro predikci RMR	56
Tabulka 2.11 Srovnání predikovaných hodnot rovnic s měřenými hodnotami RMR.....	56
Tabulka 2.12 Analýza tělesného složení u trénovací a testovací skupiny osob	58
Tabulka 2.13 Váhy neuronů pro jednotlivé tělesné parametry (průměr ±SD)	59
Tabulka 2.14 Srovnání měřené hodnoty RMR s hodnotami predikovanými neuronovou sítí	60

ÚVOD

Bakalářská práce se zabývá validací prediktivních rovnic pro určení klidového energetického výdeje, které byly odvozené různými způsoby a validovány s hodnotou klidového energetického výdeje získanou pomocí nepřímé kalorimetrie. Téma bakalářské práce jsem si vybral na základě mého zájmu o sport a výživu.

Znalost klidového energetického výdeje je důležitá v klinické dietní praxi a je základním stavebním kamenem pro hodnocení výživové potřeby. Klinický význam znalosti energetické potřeby dané osoby je důležitá jak při hladovění, tak i při nadměrném příjmu živin. Hladovění lze chápat jako dobu, po kterou je organismus vystaven hladu. Krátkodobé hladovění je stav, kdy se jedná o dobu hladovění setrvávající 72 hodin. U zdravé osoby se lidský organismus dokáže s krátkodobým hladověním vypořádat. Lidský organismus u osob, u kterých probíhá například onkologické onemocnění, se nedokáže vypořádat s hladověním a dochází ke škodlivým účinkům hladovění. Naproti tomu při nadměrném příjmu živin může docházet u nemocných jedinců ke kumulaci CO_2 v organismu, což může vést k vážným problémům u pacientů s chronickými plicními obtížemi.

V teoretické části jsem se zabýval lidským metabolismem a celkovým energetickým výdejem, který se skládá z bazálního metabolismu, respektive z klidového metabolismu neboli klidového energetického výdeje. Hodnotu celkového energetického výdeje ovlivňuje termický efekt potravy a pohybová aktivita, která je u každého jedince individuální. V teoretické části práce jsem se zabýval taktéž metabolickými poruchami a faktory, které ovlivňují celkový energetický výdej a celý metabolismus daného jedince. Dále jsem v této části popsal metodu měření pomocí nepřímé kalorimetrie a další metody měření pro stanovení klidového energetického výdeje. V závěru teoretické části jsem popsal jednotlivé prediktivní rovnice pro určení klidového energetického výdeje, kde jsem se také zabýval tím, jak byly jednotlivé rovnice odvozeny.

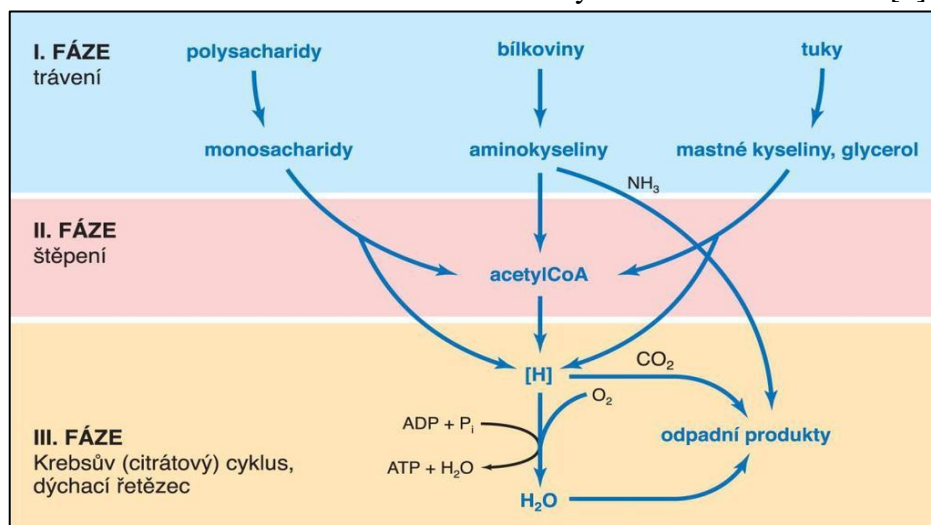
V praktické části jsem se snažil poukázat na rozdílnost klidového energetického výdeje u žen ve srovnání s muži. Poté jsem se v praktické části zabýval hlavním cílem této práce. Srovnával jsem jednotlivé prediktivní rovnice pro určení klidového energetického výdeje s měřeními hodnotami klidového energetického výdeje pomocí nepřímé kalorimetrie. Pro validaci prediktivních rovnic jsem zvolil více statistických metod. V závěru praktické části jsem stanovil vlastní postup pro predikci klidového energetického výdeje, a to pomocí regresního lineárního modelu a strojového učení.

1. TEORETICKÁ ČÁST

1.1 Metabolismus

Metabolismus je neustálá oboustranná přeměna látek a energie v lidském těle. Látková přeměna je výsledkem fyzikálních a chemických dějů, které se odehrávají uvnitř organismu a jsou zodpovědné za vytváření hormonů, enzymů, hemoglobinu a tak dále, taktéž se podílí na uvolňování energie a ukládání zásobních látek. Metabolismus zahrnuje děj katabolický a anabolický. Katabolismus je děj, při kterém se štěpí organické látky se složitější strukturou na látky s jednodušší strukturou, probíhá samovolně (např. štěpení lipidů, štěpení glukózy a tak dále). Při katabolismu se získává energie, která je potřebná pro anabolický děj. Anabolismus je děj, při kterém z látek jednoduššího charakteru vznikají složitější organické látky (např. syntéza glykogenu, fosfolipidů a proteinů). Metabolismus se v období růstu zvyšuje, v dospělosti je katabolismus a anabolismus v rovnováze a ve stáří se metabolismus snižuje. Metabolismus je řízen na hormonální a neuronové úrovni. [1]

Základní funkce metabolismu jsou energetická a látková. Na konci katabolického a anabolického děje vznikají odpadní látky, které organismus musí vyloučit. Odbourání odpadních látek z organismu probíhá ve třech fázích. První fáze probíhá v trávicím traktu za pomoci trávicích enzymů, kde jsou polysacharidy štěpeny na monosacharidy, proteiny na bílkoviny a triacylglyceroly na mastné kyseliny a glycerol. V první fázi nedochází k tvorbě energie ve formě ATP. Ve druhé fázi probíhá několikastupňová oxidace monosacharidů, aminokyselin a lipidů na amfibolické meziprodukty (pyruvát, acetylkoenzym A). V druhé fázi vzniká malé množství energie při odbourávání glukózy. Třetí fáze je nevratný děj, při kterém se získává nejvíc energie. Látky se oxidují prostřednictvím acetylkoenzym A v citrátovém cyklu, při dekarboxylaci vzniká CO_2 a při redoxních reakcích se tvoří redukované kofaktory $\text{NADH} + \text{H}^+$ a FADH_2 . [1]



Obrázek 1.1 : Schéma přeměny základních živin, převzato [2]

1.1.1 Metabolické poruchy – nemoci spojené s metabolismem

Metabolické poruchy jsou poruchy lidského organismu, kdy je nedostatečná či dokonce vůbec neprobíhá látková přeměna při činnosti lidského metabolismu. Látková přeměna umožňuje tvorbu buněk, orgánů, a tedy i celého organismu a umožňuje mu spolupracovat s dalšími orgány. Metabolické poruchy jsou nejčastěji ovlivněny geneticky, špatnou funkcí receptorů a hormonů, poruchou vnitřního prostředí, nebo například špatnou stravou (nutričně), ale i komplexně orgány např. játry, trávicím ústrojím, ledvinami. [2]

- **Tyto poruchy můžeme kategorizovat následovně:**

Tabulka 1.1 Rozdělení typů poruch metabolismu

Typy poruch	Identifikace
Iontové poruchy, poruchy acidobazické rovnováhy	Typy syndromů nebo symptomů, častá je složitá diferenciatní diagnostika
Genetická příčina (vrozené metabolické vady)	Defekt genu, syntéza určitého enzymu nebo proteinu
Receptorové poruchy	Porucha syntézy receptorů vyvolaná geneticky, odchylky stimulace receptorů, látky z prostředí, kde je receptor ovlivňován
Hormonální ovlivnění	Hormony se podílejí na katabolických a anabolických dějích a ovlivňují tak chod metabolismu
Podmínění rezistence k hormonům	Např: syndrom inzulínové rezistence, chybějící hormon nebo receptor pro hormon
Výživa	Interakce výživy s genomem, deficit výživy
Organické polutanty	Vztah ke klasickým metabolickým onemocněním (tyto polutanty se ukládají v tukové tkáni)

Diagnostika metabolických onemocnění je především biochemická, proto je při identifikaci daného onemocnění důležité posoudit stav výživy, hydratace a funkčnost daných orgánů. Metabolismus je ovlivněn orgány, především játry, trávicím ústrojím, ledvinami a kostrou našeho těla. V tomto případě se může projevit dysfunkce orgánu nebo postižení orgánu při metabolickém onemocnění. Proto je velmi důležité se zaměřit i na výživu a dietologii, protože léčba pomocí diety je u mnoha poruch metabolismu jedna z nejvýznamnějších. Metabolické děje jsou taktéž ovlivněny hormony a receptory, které mohou vyvolat metabolické poruchy. Působením a funkčností hormonů se více zabývá endokrinologie. [2]

Hormony dělíme na anabolické (např. inzulín, steroidy), katabolické (např. thyroxin, kortizol), stresové a zátěžové. Hormonální působení se podílí na vzniku metabolických onemocnění jako je například obezita, hypertenze nebo diabetes druhého typu. Taktéž hormony štítné žlázy a hormony tukové tkáně velmi ovlivňují činnost lidského těla. [2]

1.2 Celkový energetický výdej

Celkový energetický výdej (TEE) je tvořen třemi složkami, kterými jsou bazální metabolismus, energetický výdej při pohybové aktivitě a termický efekt potravy (TEF). Celkový energetický výdej je individuální pro každého jedince a je ovlivněn různými faktory. [3]

Celkový energetický výdej za jeden den se u dospělého muže s běžnou pohybovou aktivitou pohybuje v průměru okolo 2868 kcal/den a u dospělé ženy v průměru 2150 kcal/den. Lidský organismus má nejvyšší energetické nároky v období mezi 15-18 lety, s přibývajícím věkem energetické nároky organismu klesají. [4]

1.2.1 Bazální metabolismus

Bazální metabolismus (BMR = basal metabolic rate) je energie potřebná k udržení základních životních funkcí organismu, které jsou nezbytné k životu. Bazální metabolismus je ovlivněn věkem, pohlavím, tělesným složením a tělesnou teplotou. [5]

Bazální metabolismus představuje 55-75 % denního celkového energetického výdeje. Během spánku hodnota BMR klesá o 10 % a při dlouhodobém hladovění může klesnout až o 40 %. Pro stanovení hodnoty BMR jsou kladeny vysoké nároky, tudíž je měření neproveditelné, proto stanovujeme hodnoty klidového energetického výdeje. [5]

1.2.2 Klidový metabolismus

Klidový metabolismus (RMR = resting metabolic rate), neboli klidový energetický výdej (RMR resting energy expenditure) je minimální příjem energie, který potřebujeme k zajištění funkčnosti lidského organismu v danou dobu. Měří se spotřeba kyslíku a respirační kvocient každou minutu a následně se počítá hodnota klidového metabolismu pro jeden den, tudíž 24 hodin. [2]

Klidový metabolismus oproti bazálnímu metabolismu zahrnuje například energii potřebnou k udržení tělesné teploty a stálého krevního oběhu. Jedná se tedy o energetický výdej člověka, který je v naprostém fyzickém a psychickém klidu.

K výsledné hodnotě RMR u ambulantních pacientů a u zdravých lidí musíme připočítat 20-90 % (dle fyzické aktivity u daného jedince viz tabulka 1.2), protože množství spotřebované energie by neodpovídalo potřebné energii organismu při fyzické aktivitě. [2]

Klidový energetický výdej je nejčastěji měřen pomocí nepřímé kalorimetrie, toto měření nám dává nejrelevantnější hodnotu RMR. [2]

1.2.3 Termický efekt potravy

Termický efekt potravy (TEF = Thermic Effect of Food) způsobuje navýšení energetického výdeje lidského organismu z důvodů trávení, vstřebání potravy a transportní funkce živin. U zdravých jedinců stravujících se bílkovinami, sacharidy a tuky představuje TEF přibližně 8-12 % celkové spotřeby energie za jeden den. TEF se tedy

vyjadřuje procenty z přijaté energie z potravy. [3]

TEF je závislé na způsobu stravování a u jednotlivých makroživin se liší, např. u tuků se pohybuje mezi 0–3 %, u sacharidů mezi 5–10 %, u bílkovin mezi 20–30 % (bílkoviny mají největší sytící efekt to dokazuje i TEF) a taktéž u alkoholu dosahujeme vyšších procentuálních hodnot. Hodnoty TEF pro jednotlivé makroživiny jsou rozdílné, protože jednotlivé makroživiny mají rozdílné nároky na přeměnu v organismu. Tučky jsou v organismu vstřebávány nejjednodušeji, a proto mají nejnižší hodnotu TEF, naopak zpracování bílkovin v organismu je založeno na náročnějším procesu, tudíž mají vyšší hodnoty TEF. Můžeme tedy říct, že jedná o přímou úměru, čím náročnější zpracování makroživin, tím vyšší hodnota TEF. [4]

TEF dosahuje svého vrcholu okolo 90 minut po konzumaci potravy a k navrácení hodnot dochází za 2-4 hodin. U obézních a u lidí staršího věku dosahují vrcholní hodnoty TEF později. TEF se s přibývajícím věkem snižuje. [4]

TEF můžeme také členit na 2 typy termogeneze, a to na obligatorní a fakultativní. Typ obligatorní dělá celkem 50-75 % z celkové hodnoty TEF a zahrnuje energetické náklady na trávení, transport živin a také energetické náklady na syntézu bílkovin, tuků a sacharidů. Typ fakultativní termogeneze můžeme specifikovat jako odezvu hormonů na příjem potravy. Nejčastěji se projevuje po konzumaci jídla nebo po infuzi glukózy. [6]

1.2.4 Energetický výdej při pohybové aktivitě

Energetický výdej při pohybové aktivitě představuje 20-40 % z celkového energetického výdeje. Velikost energetického výdeje při pohybové aktivitě je dána především objemem a charakterem vykonané práce jednotlivce. S přibývajícím věkem se energetický výdej při pohybové aktivitě snižuje. [4]

K různým pohybovým aktivitám je přidělen faktor aktivity. Příslušným faktorem dané aktivity násobíme hodnotu RMR, což nám určuje odhad hodnoty TEE, který je potřebný pro pokrytí energetické potřeby metabolismu na jeden den. [4]

Tabulka 1.2 Faktory aktivity stanovené na základě typu pohybové aktivity, převzato [4]

Typy pohybové aktivity	Faktor aktivity
Malá nebo žádná pohybová aktivita	1,2
Pohybová aktivita provozovaná 1-3 dny v týdnu (aktivita mírné intenzity)	1,4
Pohybová aktivita provozovaná 3-5 dny v týdnu (aktivita střední intenzity)	1,6
Pohybová aktivita provozovaná 6-7 dny v týdnu (aktivita vysoké intenzity)	1,7
Pohybová aktivita provozovaná denně (velmi vysoké intenzity)	1,9

1.2.5 Faktory ovlivňující celkový energetický výdej

Bazální metabolismus (BMR), klidový metabolismus (RMR), termický efekt potravy (TEF) a energetický výdej při pohybové aktivitě mohou být ovlivňovaný několika faktory. [2]

Bazální metabolismus (BMR) a klidový metabolismus (RMR) jsou ovlivněny především endokrinním systémem a genetikou jedince. Genetické faktory ovlivňují hodnotu BMR a RMR přímo, což znamená, že podle genetických predispozic bude mít někdo hodnoty BMR a RMR vyšší a někdo naopak nižší. [2]

Termický efekt potravy (TEF) je též ovlivněn genetickými faktory, věkem, tělesnou zdatností, úrovní obezity, ale je taktéž ovlivněn stravou – velikostí porce, obsahem živin (složením stravy) a načasováním jídla. [34][15]

Energetický výdej při pohybové aktivitě je ovlivněn především tělesnou skladbou jedince, věkem, pohlavím, genetickými faktory, druhem pohybové aktivity, počtem zapojení svalových vláken, intenzitou vykonané práce, délkou trvání aktivity a prostředím, ve kterém je pohybová aktivita prováděna. [4]

Celkový energetický výdej (TEE) je ovlivněn několika faktory, kterými jsou:

- **Velikost těla**

Z hlediska velikosti těla hodnotu RMR ovlivňuje výška, tělesná hmotnost a povrch těla. Jedinci vyššího vzrůstu mají vyšší hodnotu RMR oproti jedincům menšího vzrůstu. Objemnější jedinci mají obvykle vyšší hodnotu RMR než hubení jedinci. Čím větší je povrch těla, tím jsou tepelné ztráty výraznější a organismus musí více pracovat na doplnění ztraceného tepla a udržení stálé teploty. Čím větší povrch těla, tím vyšší hodnota RMR. Největší roli hraje poměr tělesné váhy k výšce. Nejvyšší hodnotu BMR mají vysocí a objemní lidé, protože mají největší povrch těla. [7][8]

- **Složení těla**

Netuková tělesná hmota je tkáň metabolicky aktivnější než tkáň tuková. Svalnatí jedinci mají vyšší hodnoty RMR než lidé s běžnou svalovou hmotou. Budeme-li mít dvě osoby, které budou stejně vysoké a budou mít stejnou tělesnou hmotnost, ale jedna osoba bude mít více svalové tkáně a méně tukové tkáně než druhá osoba, tak vyšší hodnotu BMR bude mít osoba s větší svalovou tkání. Z výživového hlediska můžeme říct, že čím více budeme mít aktivní svalové hmoty, tím se nám bude snáz regulovat podkožní tuk. Muži ve srovnání s ženami mají obecně vyšší hodnotu RMR, protože mají více svalové tělesné hmoty a méně tukové tkáně. [7][8]

- **Věk**

Hodnoty RMR jsou nejvyšší v období růstu a s přibývajícím věkem hodnoty RMR klesají. Pokles RMR s rostoucím věkem je velmi úzce spojen s úbytkem svalové tělesné

tkáně, které se s přibývajícím věkem snižuje metabolická aktivita. Aktivní tělesné hmoty ubývá s věkem stejně u mužů i u žen. S rostoucím věkem bychom měli úměrně zvýšit fyzickou aktivitu. [7][8]

- **Vliv hormonů**

Metabolismus je řízen hormony štítné žlázy, tyroxinem a trijodtyroninem. Je-li hladina hormonů štítné žlázy v organismu nedostatečná nebo snižená, tak hodnota RMR je snižená. Naopak je-li hladina hormonů štítné žlázy dostatečná, tak hodnota RMR je zvýšená. Metabolismus je taktéž ovlivněn hormonem dřeně nadledvin, který se nazývá adrenalin. Adrenalin působí krátkodobě, má rychlý nástup a hodnotu RMR zvyšuje. Jestliže je poškozena produkce hormonů kůry nadledvin, tak je hodnota RMR snižená. [7][8]

- **Pohlaví**

Ženy ve srovnání s muži v poměru ke svalům mají více tukové tkáně než muži, tudíž ženy mají zhruba o 5–10 % nižší RMR. S přibývajícím věkem je tento rozdíl méně výrazný. Například tělo mladého muže má v průměru 14 % tělesného tuku, kdežto tělo mladé ženy má v průměru 24 % tělesného tuku. [7][8]

- **Tělesná teplota**

Při zvýšené tělesné teplotě se zvyšuje energetický výdej. Při zvýšení teploty o jeden stupeň se bazální metabolismus zvyšuje o 12 % až 13 %. Bazální energetický výdej se zvyšuje při infekčních onemocněních, sepsi, leukémii, některých srdečních vadách nebo hypertenzi. [7][8]

- **Klima**

Bazální a klidový energetický výdej je taktéž ovlivněn klimatickými podmínkami. V chladných podmínkách se energetický výdej zvyšuje až na trojnásobek. V tropickém prostředí je energetický výdej vyšší cca o 5-20 % než v běžném prostředí. Například při fyzické aktivitě v prostředí o teplotě 30 °C je klidový energetický metabolismus zvýšen až o 5 % oproti prostředí o pokojové teplotě okolo 22 °C.[7][8]

- **Rasa**

Energetický výdej mají vyšší Evropané v porovnání například s Asiaty nebo Číňany, což je spojeno s tělesným rozložením a povrchem těla. [8]

- **Další faktory ovlivňující celkový energetický výdej**

Při konzumaci alkoholu, kofeinu, nikotinu, zeleného čaje a stimulačních látek roste energetický výdej. [8]

1.3 Metody měření energetického klidového výdeje

Nepřímá kalorimetrie a další metody pro měření energetického klidového výdeje jsou založeny na spotřebě O₂ a výdeji CO₂, tudíž můžeme říct, že základním kamenem těchto metod je mechanika dýchání.

- **Mechanika dýchání**

Dýchání je jedna ze základních životních funkcí organismu, při které dochází k výměně plynů v plicích sklípcích (alveolech). Dýchání má dvě fáze. První fází je vdech (inspirace), to je aktivní děj a výdech (expirace), to je pasivní děj. Pomocí dýchání přijímá organismus kyslík ze vzduchu, který putuje do tkání. [9]

Kyslík slouží k základním metabolickým procesům. Jedním z konečných produktů dýchání je oxid uhličitý, který je tvořen v organismu několika oxidačními ději, dalším konečným produktem je voda a další odpadní látky. [9]

Dýchání je umožněno plicemi. Plíce jsou vakovitý elastický orgán uložený v hrudní dutině. Plíce komunikují s okolním prostředím pomocí dýchacích cest, které jsou tvořeny průdušnicí (tracheou) a dvěma průduškami (bronchy), které se dále větví v průdušinky (bronchioly). Jakmile se vzduch v plicích vymění, neokysličená krev se stane okysličenou a pomocí krevního oběhu se kyslík rozvádí do tkáně pro další výměnu vzduchu. V plicích je malý počet průdušek zodpovědný za roznos vzduchu do plicních sklípků. Při normální respiraci se bránice regulérně stáhne a bude stažena dolů. Ve stejnou chvíli se stáhnou i mezižeberní svaly, objem hrudní dutiny se zvýší a vnitřní tlak klesne o 3 až 5mmHg. Takže vzduch může snadno vstoupit do dutiny hrudní. [9]

Jsou zde dva centrální ovládací systémy spojené s respirací. Jeden je ovládán vůlí a druhý je ovládán podvědomě, reguluje respirační aktivity samovolně. Samovolná respirace je kontrolována respiračním centrálním ovládním v dřeni. Toto centrum může nastavovat vzduchovou výměnu podle potřeby lidského těla. K výměně kyslíku za oxid uhličitý dochází na velmi tenkém povrchu plicních sklípků. [9]

Dýchání dělíme na vnitřní, což je výměna kyslíku a oxidu uhličitého mezi krví a tkáněmi a na vnější, což je difúze kyslíku a oxidu uhličitého ze vzduchu do krve. U dospělého člověka je dýchací plocha všech alveolů okolo 100 m². V klidovém stavu spotřebuje dospělá osoba asi 0,25 litru kyslíku a vydechne 0,2 litru oxidu uhličitého. S tělesnou námahou spotřeba kyslíku vzrůstá. Objem dýchacích cest je v průměru 150 ml, který nazýváme anatomický mrtvý dýchací prostor. Vzduch v dýchacích cestách se nepodílí na výměně plynů. [9]

1.3.1 Nepřímá kalorimetrie

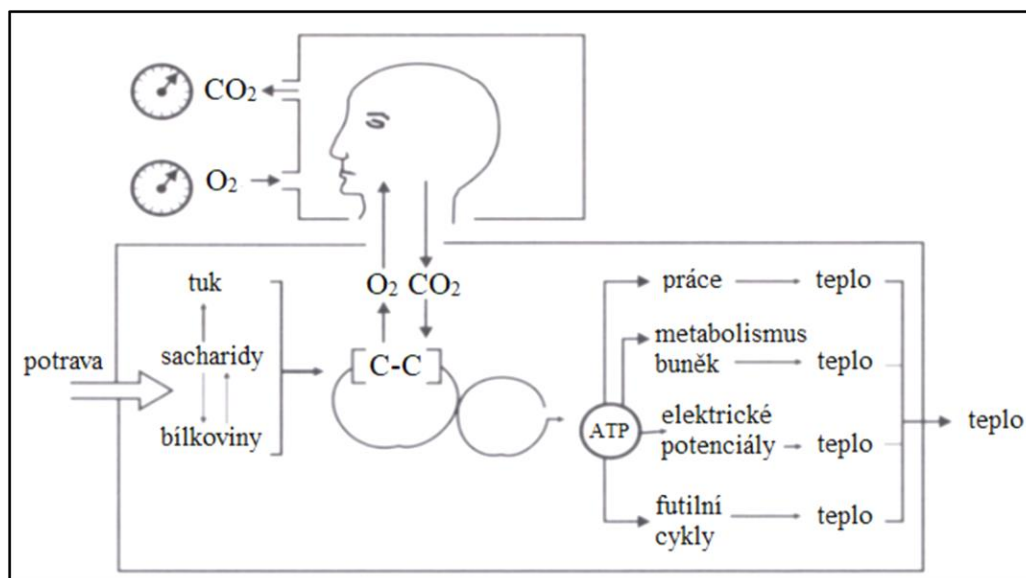
Nepřímá kalorimetrie je nejvyžívanější metoda pro stanovení energetického výdeje. Nepřímá kalorimetrie je založena na měření spotřeby kyslíku a výdeje oxidu uhličitého. Na základě těchto naměřených hodnot můžeme přímo určit spotřebovanou energii. Kyslík a oxid uhličitý jsou vhodné plyny pro výpočet klidového energetického výdeje, protože závisí kvantitativně na využití nutričních substrátů. [10]

- **Komponenty pro měření nepřímé kalorimetrie**

Základními komponenty nepřímé kalorimetrie jsou snímač objemu plynů (v našem případě MetaLyzer® 3B), sada obličejových masek CORTEX, hadička pro odběr vzorků plynu, program MetaSoft®Studio s automatickým ergometrem a Meta-Soft®Studio pro kalibraci celého přístroje.

- **Princip nepřímé kalorimetrie**

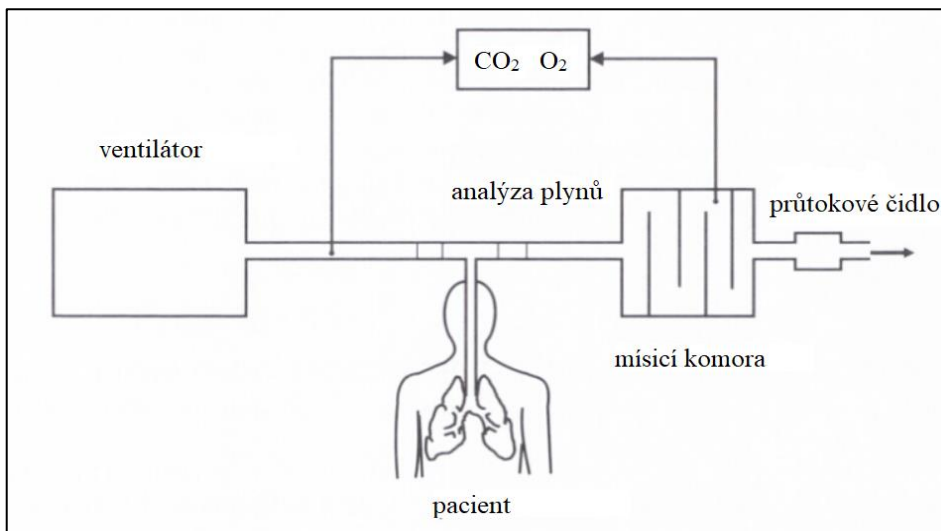
Měření pomocí nepřímé kalorimetrie probíhá buď bez zátěže nebo při standardizované zátěži. Pacientovi je v obou případech aplikována maska na obličej, která směřuje veškerý vdechovaný kyslík a vydechovaný oxid uhličitý do jednoho bodu, kde je umístěn snímač průtoku pro kyslík a oxid uhličitý. Uvnitř snímače se nachází konektor hadičky pro odběr vzorků plynu. Naměřené hodnoty a veličiny jsou zpracovány v počítači. Měříme celkovou spotřebu vzduchu, která závisí na úbytku kyslíku a výdeji oxidu uhličitého ve vydechovaném vzduchu. [11][12]



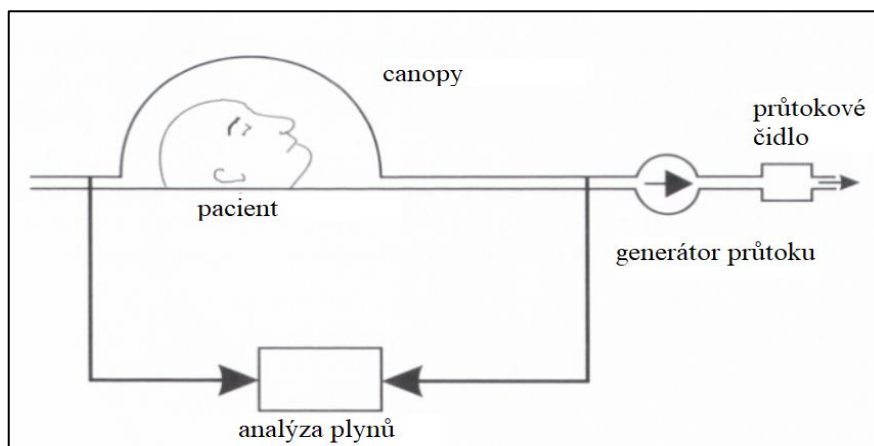
Obrázek 1.2 Schéma principu nepřímé kalorimetrie, převzato [10]

Nepřímou kalorimetrii můžeme rozdělit na systém s otevřeným nebo uzavřeným systémem.

Nepřímá kalorimetrie využívá dvou typů s otevřeným systémem. Otevřený systém s mísicí komorou se využívá u pacientů umístěných na umělé plicní ventilaci a otevřený systém s použitím canopy se využívá pro spontánně ventilující pacienty. Nepřímá kalorimetrie využívající otevřený systém spočívá v tom, že měřená osoba dýchá atmosférický kyslík a vydechuje oxid uhličitý, který směřuje do snímače objemu plynů nebo do vakua. [10][13]



Obrázek 1.3 Nepřímá kalorimetrie – otevřený systém s mísicí komorou pro měření pacientů na umělé ventilaci, převzato [10]



Obrázek 1.4 Nepřímá kalorimetrie – otevřený systém měření pomocí canopy u spontánně ventilujícího pacienta, převzato [10]

Při nepřímé kalorimetrii s uzavřeným systémem je měřená osoba oddělena od okolního prostředí (ovzduší), kyslík je dodáván z tlakové lahve a oxid uhličitý je vydechován do uzavřeného okruhu. Vydechovaný oxid uhličitý musí projít filtrem, ve kterém je natronové vápno, které pohltí vydechovaný oxid uhličitý. Příkladem takového přístroje je například Kroghův respirometr. [13]

- **Předpoklady u nepřímé kalorimetrie**

Nepřímá kalorimetrie je založena na následujících předpokladech. Prvním předpokladem je, že spotřeba kyslíku a výdej oxidu uhličitého závisí kvantitativně na využití nutričních substrátů. Druhým předpokladem je, že spotřebovaný kyslík a vylučovaný oxid uhličitý přechází do dechu výhradně plicemi. Třetím předpokladem je, že kyslík a oxid uhličitý se chovají jako ideální plyn. Čtvrtým předpokladem je, že se kyslík a oxid uhličitý nehromadí v organismu. Tyto všechny předpoklady nejsou vždy dodrženy přesně. [10]

- **Konstanty používané v nepřímé kalorimetrii**

Tabulka 1.3 Spotřeba O₂, výdej CO₂ a tvorba energie z energetických substrátů, převzato [10]

Substrát (na 1 g)	VO ₂ (l/g)	VCO ₂ (l/g)	RQ	Energetická hodnota (kcal/g)
Sacharidy	0,829	0,829	1,0	4,18
Tuky	2,19	1,427	0,71	9,46
Bílkoviny	0,966	0,782	0,81	4,32

- **Ustálený stav**

Ustálený stav neboli steady state, je časový interval, který probíhá během posledních pěti minut. Za ustálený stav považujeme časový interval, během kterého je každá průměrná hodnota minutové spotřeby O₂ a produkce CO₂ nezměněna o více jak 10 % a zároveň průměrná hodnota respiračního kvocientu (RQ) se nezměnila o více jak 5 %. [35]

Výpočet klidového energetického výdeje vychází právě z ustáleného stavu a je vypočten dle rovnice uvedené níže. Do rovnice dosazuje průměrnou hodnotu spotřeby kyslíku a produkce oxidu uhličitého. Tyto průměrné hodnoty jsou vypočteny pouze z ustáleného stavu. Jestliže daná osoba během půlhodinového měření nedosáhne ustáleného stavu, musíme poté vybrat manuálně časový interval, který se nejvíce blíží ustálenému stavu a klidový energetický výdej počítáme z tohoto intervalu.

- **Energetický ekvivalent a respirační kvocient**

Energetický ekvivalent a respirační kvocient jsou veličiny, které byly zavedeny pro hodnocení přeměny energie a jsou vzájemně závislé. Hodnoty obou veličin se určují z výsledků plynové bilance organismu.

Energetický ekvivalent počítáme dle vzorce $EEK = Q_n/VO_2 [kJ/l]$, kde Q_n je spalné teplo živiny uváděno v kJ a VO₂ je objem spotřebovaného kyslíku v litrech. [11]

Respirační kvocient počítáme dle vzorce $RQ = VCO_2/VO_2$, kde VCO₂ je objem vydýchaného oxidu uhličitého v litrech a VO₂ je objem spotřebovaného kyslíku v litrech. [11][12]

- **Spotřeba kyslíku**

Nepřímá kalorimetrie počítá spotřebu kyslíku dle následujícího vzorce:

$VO_2 = [(Q/I - F_{I_{O_2}})] \times [(F_{O_2} - F_{I_{O_2}}) \times (FCO_2)]$, kde Q je celkový průtok systémem, $F_{I_{O_2}}$ je frakční inspirovaná koncentrace kyslíku, F_{O_2} je frakční koncentrace kyslíku a FCO_2 je frakční koncentrace oxidu uhličitého. [14]

- **Výdej oxidu uhličitého CO_2**

Výdej oxidu uhličitého nepřímá kalorimetrie počítá dle následujícího vzorce:

$VCO_2 = Q \times (FCO_2)$, kde Q je celkový průtok systémem a FCO_2 je frakční koncentrace oxidu uhličitého. [14]

- **Výpočet energetického výdeje**

Energetický výdej je počítán nepřímou kalorimetrií dle vzorce, který odvodil Weir.

$TEE = VO_2 \times 3,94 + VCO_2 \times 1,11 - \text{odpadní dusík v moči} \times 2,17$, kde VO_2 je spotřeba kyslíku a VCO_2 je výdej oxidu uhličitého. [10]

Weir poté zjistil, že zanedbání odpadního dusíku v moči v jeho odvozené rovnici způsobí chybu pouze 1 % a zjednodušil tak původní rovnici do následujícího tvaru.

$TEE = VO_2 \times 3,94 + VCO_2 \times 1,11$ [10]

1.3.2 Přenosný nepřímý kalorimetr – Fitmate GS

Fitmate GS byl prvním přenosným přístrojem, který slouží pro měření nepřímé kalorimetrie. Přístroj měří klidový energetický výdej a umožňuje tak nutriční péči u pacientů upoutaných na lůžko. Fitmate GS měří pouze spotřebu kyslíku (VO_2) a předpokládá konstantní respirační kvocient (RQ), který je nastavený na hodnotu 0,85 nebo na hodnotu, která je zadána uživatelem. Spotřeba kyslíku (VO_2) je měřena v reálném čase a je zaznamenána do grafu každých 30 sekund. Pro měření se využívá silikonová maska nebo kanopy a průtokové čidlo, ve kterém je senzor kyslíku. Výhodou Fitmate GS je jednoduchost a rychlost měření a další výhodou je, že nemusíme přístroj kalibrovat pomocí přesných kalibračních plynů. [39]

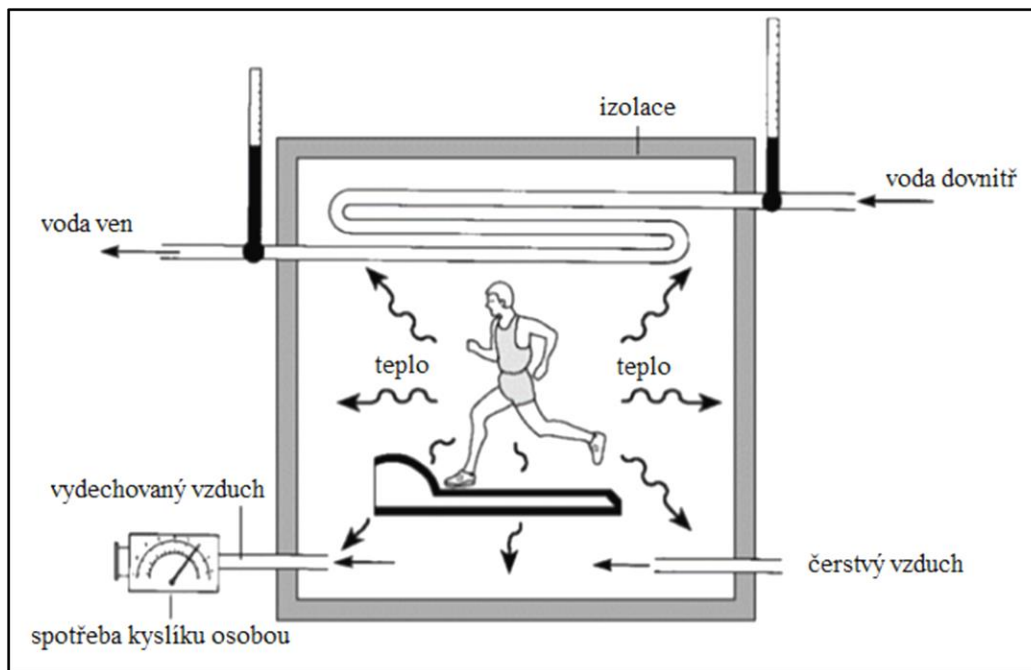


Obrázek 1.5 Přenosný nepřímý kalorimetr Fitmate GS, převzato [39]

1.3.3 Další metody měření klidového energetického výdeje

- **Přímá kalorimetrie**

Jedná se o metodu, u které je pacient umístěn do uzavřené tepelně izolované komory. Uvnitř komory je nádoba s vodou, která vlivem uvolnění tepla z organismu mění svoji teplotu, kterou snímáme. Zároveň snímáme příjem kyslíku a výdej oxidu uhličitého a vyloučení dusíku močí a stolicí. Zjišťujeme energetický výdej daného organismu. [11]



Obrázek 1.6 Schematicky znázorněný princip přímé kalorimetrie, převzato [15]

Přímá kalorimetrie počítá individuální výdej energie v klidu nebo při konkrétní aktivitě. Uvolněná energie z organismu způsobí zvýšení tepla v komoře. [11]

Ze vztahu $dq = c * dt$, kde c je měrné teplo a dt příslušná změna teploty tělesa, vypočítáme tepelnou energii, která byla uvolněna z organismu. Přímá kalorimetrie je velmi náročná na technické požadavky, tudíž se téměř nevyužívá. V dnešní době se využívá pouze na experimentální účely na zvířatech. [11]

- **Analyzátor VO₂ master**

Analyzátor VO₂ master je poměrně nová technologie. Hlavní využití si tento analyzátor najde ve sportovním odvětví. Analyzátor VO₂ master je obličejová maska, která měří spotřebu kyslíku a slouží k testování výkonu jako je VO₂ max, k měření klidového energetického výdeje, k sledování tréninkových zón nebo k sledování frekvence dýchání při zátěži. Analyzátor měří průtoky vzduchu od 2 do 250 litrů za minutu. [59]

Výhodou tohoto analyzátoru je, že měřená osoba má pouze masku a nemusí být zatížena dalším příslušenstvím. Naměřené hodnoty jsou přenášeny telemetricky do mobilního zařízení nebo do počítače potažmo do tabletu. [59]

- **Přístroj InBody 770**

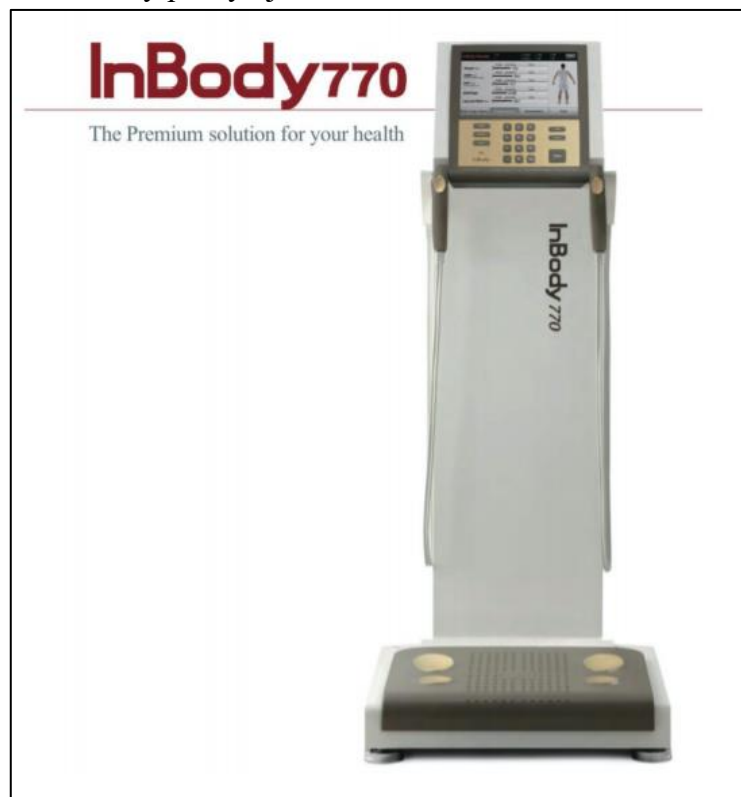
InBody je přístroj, který slouží k analýze lidského těla. Pro analýzu se využívá elektrický proud, který se šíří rozdílně v různých biologických tkáních. Netuková hmota obsahuje více vody, proto se elektrický proud šíří lépe v netukové hmotě než v hmotě tukové. Přístroj poskytuje informace jako je váha, celková tělesná voda, tělesný tuk, hmotnost kosterních svalů, BMI, WHR a určuje klidový energetický výdej, což je pro tuto práci zásadní. [40]

InBody počítá klidový energetický výdej z naměřených dat, zásadní naměřenou veličinou pro predikci klidového energetického výdeje je hodnota FFM, což je tělesná hmota bez tukové hmoty. Rovnice pro predikci RMR je stejná pro muže i ženy a jedná se o Katch-McArdlerovu rovnici, která je v této práci uvedena v kapitole 1.4. [40]

Rovnice dle, které InBody predikuje RMR je následující:

$$M/\text{Ž}: 370 + 21,6 \times FFM \text{ [kcal/den]} \text{ [48]}$$

InBody se využívá u pacientů, kteří mají problémy s ledvinami, sleduje se rovnováha mezi tělesnou vodou, bílkovinami, tělesným tukem a minerály. Diagnostika, ve sportovním odvětví pro sledování redukce tuku, nebyla primárně určena pro tuto potřebu, je to něco navíc co InBody poskytuje.

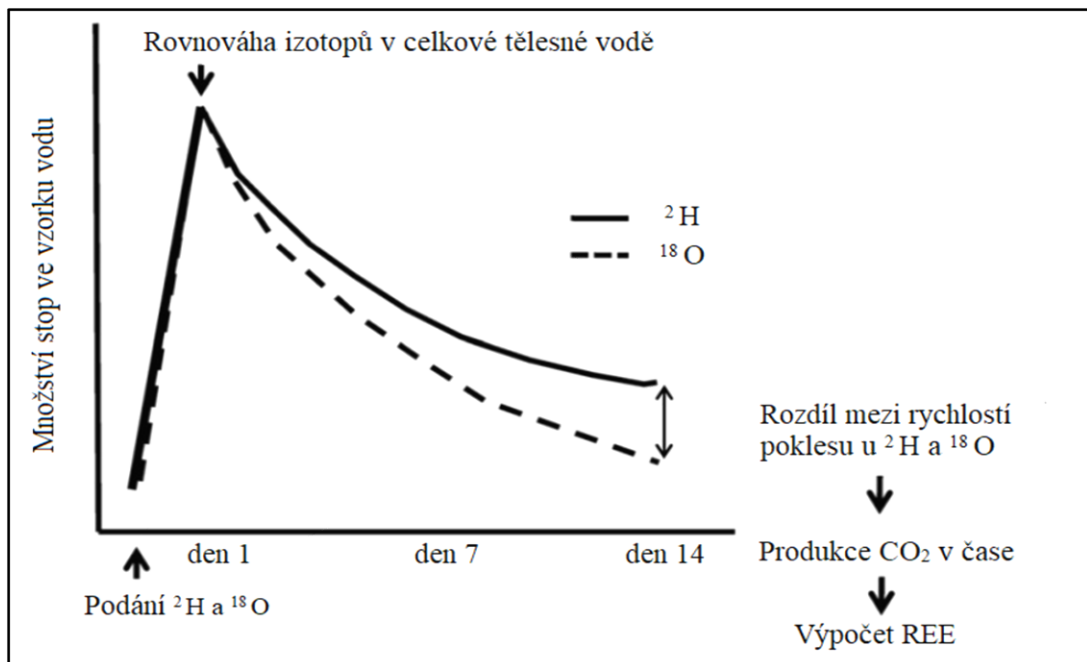


Obrázek 1.7 Přístroj InBody 770, převzato [40]

- **Metoda dvojité značené vody a značeného bikarbonátu**

Metoda Doubly Labeled Water neboli metoda dvojité značené vody slouží k určení energetického výdeje u osob v běžných životních podmínkách. Tato metoda byla vyvinuta, protože měření pomocí přímé a nepřímé kalorimetrie vyžaduje náročné laboratorní podmínky. Při této metodě se sleduje kinetika stabilního izotopu vody v organismu. Jedná se tedy o metodu, která využívá rozdílného vylučování izotopu kyslíku a vodíku, které jsou závislé na tvorbě oxidu uhličitého. [36]

Dvojité značená voda, která je indikována, obsahuje těžší izotopy vodíku a kyslíku než voda, která se vyskytuje v těle organismů. Dvojité značená voda se podává na začátku měření. Jedná se o deuterium ^2H nebo tritium ^3H a ^{18}O nebo ^{17}O . Vodík je vylučován z organismu močí, tedy vodou a kyslík je vylučován s vodou, a i jako CO_2 . Rozdílné vylučování těchto izotopů vede k produkci CO_2 v čase. [36]



Obrázek 1.8 Pokles hladin ^2H a ^{18}O v celkové tělesné vodě během měření, převzato [37]

Metoda značeného bikarbonátu je principiálně podobná jako metoda dvojité značené vody. Rozdíl je v tom, že do organismu se zavádí ^{13}C . Po podání ^{13}C měříme množství ^{13}C ve vzorcích moči nebo slin. Naměřené množství ^{13}C ve vzorku moči nebo slin je úměrné produkci CO_2 v organismu. Tato metoda je výhodná krátkým časem měření, ale v praxi se téměř nevyužívá. Využití je spíše experimentální na zvířatech. [38]

1.4 Přehled prediktivních rovnic pro určení klidového energetického výdeje

Velkou výhodou prediktivních rovnic pro určení RMR je, že nepotřebujeme žádné drahé přístroje pro určení RMR pro danou osobu, ale můžeme si vypočítat danou hodnotu RMR z pohodlí domova. Nevýhodou prediktivních rovnic pro určení klidového energetického výdeje je fakt, že jednotlivé rovnice zavádí určitou chybu, která může zásadním způsobem ovlivnit negativně výsledek dané rovnice až o 1000 kcal za jeden den. Rozsah těchto chyb pro jednotlivé rovnice je v této práci vyhodnocen níže.

- **Harris-Benedictova rovnice**

Harris-Benedict je jedna z nejznámějších rovnic pro výpočet bazálního metabolismu. Nejčastěji se v knihách setkáváme s původní rovnicí z roku 1918, která byla v roce 1984 modifikována. V této rovnici se počítá s hmotností, výškou a věkem dané osoby. [16]

Rovnice jsou rozdílné pro muže a ženy. Rovnice označená písmenem M je rovnice určená pro muže a rovnice označená písmenem Ž je rovnice určená pro ženy. Výsledná hodnota se udává v kcal spotřebovaných za jeden den. [16]

$$M: 66,473 + 13,7516 \times \text{váha (kg)} + 5,0033 \times \text{výška (cm)} - 6,755 \times \text{věk [kcal/den]}$$

$$Ž: 655,0955 + 9,5634 \times \text{váha (kg)} + 1,8496 \times \text{výška (cm)} - 4,7 \times \text{věk [kcal/den]} [16]$$

Rovnice byla odvozena v roce 1918 z 239 zdravých jedinců, kde z celkového počtu bylo 136 mužů, 103 žen a 94 dětí. Váha měřených jedinců byla 40-125 kg, výška měřených jedinců se pohybovala 151-200 cm, do těchto hodnot nebyly zahrnuté děti. Odvození rovnice bylo založené na měření osob v dobrém zdravotním stavu. Při odvozování rovnice bylo zjištěno, že produkce tepla není úměrná povrchu těla, ale tělesné hmotnosti, výšce a věku. [16]

- **Revidovaná Harris-Benedictova rovnice z roku 1984**

Revidovaná Harris-Benedictova rovnice byla v roce 1984 odvozena z údajů, které byly zjištěny pomocí nepřímé kalorimetrie. Pro odvození rovnice bylo provedeno měření na 239 osobách. Odvození rovnice bylo postaveno na základě naměřených údajů a publikovaných údajů Benediktem. Rovnice byla odvozena z predikce klidového výdeje oxidu uhličitého z věku, výšky, tělesné hmotnosti a pohlaví. Naměřené hodnoty byly získané od osob, které pokrývají široké věkové rozmezí, které je 98. [32]

Studie hodnotila vztah mezi měřenými hodnotami klidového energetického výdeje a věkem, pohlavím a tělesnou hmotností daného jedince. Studie ukázala, že predikovaná hodnota výdeje oxidu uhličitého podvyživených jedinců znehodnotila naměřenou hodnotu, zatím co u normálně vyživovaných jedinců se naměřená hodnota výdeje oxidu uhličitého nelišila od predikované hodnoty výdeje oxidu uhličitého. Tato rovnice určuje

klidový energetický výdej u normální zdravé osoby s přesností 14 %, zatím co u podvyživených jedinců je rovnice nespolehlivá. [32]

$$M: 88,362 + 13,397 \times \text{váha (kg)} + 4,799 \times \text{výška (cm)} - 5,677 \times \text{věk [kcal/den]}$$

$$\text{Ž: } 477,593 + 9,247 \times \text{váha (kg)} + 3,098 \times \text{výška (cm)} - 4,33 \times \text{věk [kcal/den]} \text{ [32]}$$

- **Bernsteinova rovnice**

Bernstein odvodil tři typy rovnic, kde první Bernsteinova rovnice počítá s váhou, výškou a věkem dané osoby. Rovnice je zvlášť pro ženy a muže. Výsledná hodnota se udává v kcal spotřebovaných za jeden den. [17]

$$M: 11,02 \times \text{váha (kg)} + 10,23 \times \text{výška (cm)} - 5,8 \times \text{věk} - 1032 \text{ [kcal/den]}$$

$$\text{Ž: } 7,48 \times \text{váha (kg)} - 0,42 \times \text{výška (cm)} - 3 \times \text{věk} + 844 \text{ [kcal/den]} \text{ [17]}$$

Bernstein odvodil dvě rovnice pro predikci klidového energetického výdeje, které zahrnují hodnoty spojené s tělesným tukem dané osoby. Nevýhodou těchto rovnic je vedlejší měření nebo počítání tělesného tuku dané osoby. Množství tělesného tuku můžeme měřit například pomocí přístroje InBody nebo vypočítat pomocí rovnice. [17]

Obě rovnice jsou univerzální pro muže i ženy. Výsledná hodnota se uvádí v kcal za den. Hodnota FM udává množství tukové hmoty z celkové tělesné hmotnosti. Hodnota FFM udává tělesnou hmotu bez tuku. [17]

$$M/\text{Ž: } 686 + 18,44 \times \text{FFM} + 7,8 \times \text{FM} - 3,14 \times \text{věk [kcal/den]}$$

$$M/\text{Ž: } 236,7 + 19,02 \times \text{FFM} + 3,72 \times \text{FM} - 1,55 \times \text{věk [kcal/den]} \text{ [17]}$$

Rovnice pro výpočet množství tělesného tuku můžeme počítat pomocí vzorce:

$$FM = 4,95 \times \text{objem těla (m}^3\text{)} - 4,50 \times \text{tělesná hmotnost (kg)}$$

$$FFM = \text{tělesná hmotnost (kg)} - FM \text{ (kg)} \text{ [17]}$$

Klidová rychlost metabolismu byla měřena na 202 obézních osobách, z toho bylo 154 žen a 48 mužů. Při této studii se ukázalo, že u obou pohlaví byly jednorozměrné korelace mezi RMR a tělesnou hmotou bez tukové tkáně, hmotností tělesného tuku, celkovou tělesnou hmotností a počtem tukových buněk z celkové tělesné vody. U žen se objevily významné korelace mezi RMR a počtem tukových buněk z celkového tělesného draslíku. Při studii bylo také zjištěno, že hormony štítné žlázy nebo inzulin nemají vysoký vliv na predikci RMR. Při studii bylo zjištěno, že významnými prediktory RMR je počet tukových buněk a hmotnost tukových buněk. Ze studie vyplývá, že rozdíl v RMR mezi pohlavím je pravděpodobně způsoben vyšším podílem netukové hmoty u mužů, taktéž se ukázalo, že vliv věku byl nízký. [17]

Tabulka 1.4 Podmínky nepřímé kalorimetrie pro Bernsteinovu studii, převzato [33]

Přístroj, kterým bylo provedeno měření	Doba na lůžku před měřením
Beckman	30 minut
Byla prováděna kalibrace přístroje	Délka měření
Ne	Neurčena
Doba půstu před měřením	Teplota v místnosti, kde probíhalo měření
12 hodin	22-25 °C
Omezení před měřením	Rovnovážený stav byl definovaný
Žádné omezení	Ne

- **Mifflinova rovnice**

Mifflin odvodil dvě rovnice pro výpočet klidového energetického výdeje. První rovnice bere v potaz pohlaví a počítá s váhou, výškou a věkem dané osoby. V rovnici dosazujeme za pohlaví, pro muže hodnotu 1 a pro ženy 0. [18]

$$M/\dot{Z}: 9,99 \times \text{váha (kg)} \times 6,25 \times \text{výška (cm)} - 4,92 \times \text{věk} + 166 \times \text{pohlaví} - 161$$

[kcal/den] [18]

Druhá rovnice počítá s hodnotou FFM. Rovnice je univerzální jak pro muže, tak i pro ženy.

$$M/\dot{Z}: 19,7 \times FFM + 433$$

[kcal/den] [18]

Tato prediktivní rovnice pro výdej klidového energie byla odvozena z 498 zdravých osob, z toho bylo 247 žen a 251 mužů, ve věku 19 až 78 let. Pro odvození této rovnice se testovali jedince, kteří měli normální tělesnou hmotnost a nadváhu. Klidový energetický výdej byl měřen pomocí nepřímé kalorimetrie. Výsledné rovnice uvažují v potaz rozdíl mezi ženami a muži. [18]

Tabulka 1.5 Podmínky nepřímé kalorimetrie pro Mifflinovu studii, převzato [33]

Přístroj, kterým bylo provedeno měření	Doba na lůžku před měřením
Sensormedics hood; standardní protokol	Nestanovený
Byla prováděna kalibrace přístroje	Délka měření
Ne	20 minut, v místnosti měření hrála hudba
Doba půstu před měřením	Teplota v místnosti, kde probíhalo měření
12 hodin	Neučena
Omezení před měřením	Rovnovážený stav byl definovaný
Žádné cvičení a kouření před měřením	Ano, 3 minuty

- **Owenova rovnice**

Owen vytvořil dvě rovnice zvlášť pro muže a ženy. Výsledná hodnota obou rovnic vyjadřuje kcal za den.

Níže uvedené rovnice počítají s váhou dané osoby.

$$M: 10,2 \times \text{váha (kg)} + 879 \text{ [kcal/den]}$$

$$Ž: 7,18 \times \text{váha (kg)} + 795 \text{ [kcal/den]} \text{ [19]}$$

Níže uvedené rovnice počítají s hodnotou FFM.

$$M: 22,3 \times \text{FFM} + 290 \text{ [kcal/den]}$$

$$Ž: 19,7 \times \text{FFM} + 334 \text{ [kcal/den]} \text{ [19]}$$

Owenova rovnice byla odvozena z měření na 104 osobách, z toho bylo 44 žen a 60 mužů. Věkové rozmezí jednotlivců se pohybovalo od 18 do 82 let a hodnota BMI se pohybovala od 18 do 50. Tělesná hmotnost se pohybovala od 43 do 171 kg. Studie poukazuje, že metabolická aktivita daného organismu nemusí být ovlivněna obezitou. Dále se ve studii vycházelo z měření termického efektu potravy. Ve studii se ukázalo, že dostupné prediktivní rovnice nadhodnocují u žen RMR až o 14 %. Výsledné rovnice se odvozovaly zvlášť pro ženy a pro muže. [19][20]

Tabulka 1.6 Podmínky nepřímé kalorimetrie pro Owenovu studii, převzato [33]

Přístroj, kterým bylo provedeno měření	Doba na lůžku před měřením
Náustek nebo obličejová maska Beckman	30 minut
Byla prováděna kalibrace přístroje	Délka měření
Ne	Interval 2krát 15 minut
Doba půstu před měřením	Teplota v místnosti, kde probíhalo měření
12-13 hodin	22-24 °C
Omezení před měřením	Rovnovážný stav byl definovaný
Žádné omezení	Ne

- **Schofieldova rovnice**

Schofieldovy rovnice jsou kategorizovány dle věku. Schofield odvodil celkově šest rovnic z toho tři pro muže a tři pro ženy v roce 1989. Výsledná hodnota rovnic je uváděna v MJ za jeden den.

$$M \text{ (věk 18-30): } 0,063 \times \text{váha (kg)} + 2,896 \text{ [MJ/den]}$$

$$M \text{ (věk 30-60): } 0,048 \times \text{váha (kg)} + 3,653 \text{ [MJ/den]}$$

$$M \text{ (věk >60): } 0,049 \times \text{váha (kg)} + 2,459 \text{ [MJ/den]}$$

$$Ž \text{ (věk 18-30): } 0,062 \times \text{váha (kg)} + 2,036 \text{ [MJ/den]}$$

$$\begin{aligned} \check{Z} (\text{věk } 30-60): & 0,034 \times \text{váha (kg)} + 3,538 \text{ [MJ/den]} \\ \check{Z} (\text{věk} > 60): & 0,038 \times \text{váha (kg)} + 2,755 \text{ [MJ/den]} \text{ [22]} \end{aligned}$$

V roce 2002 byly rovnice přepočítány v Institute of Medicine Equation. Tyto rovnice jsou též kategorizovány dle věku a počítají s váhou a výškou dané osoby.

$$\begin{aligned} M (\text{věk } 18-30): & 0,063 \times \text{váha (kg)} + 0,042 \times \text{výška (m)} + 2,953 \text{ [MJ/den]} \\ M (\text{věk } 30-60): & 0,048 \times \text{váha (kg)} + 0,011 \times \text{výška (m)} + 3,670 \text{ [MJ/den]} \\ M (\text{věk} > 60): & 0,038 \times \text{váha (kg)} + 4,068 \times \text{výška (m)} - 3,491 \text{ [MJ/den]} \\ \check{Z} (\text{věk } 18-30): & 0,057 \times \text{váha (kg)} + 1,148 \times \text{výška (m)} + 0,411 \text{ [MJ/den]} \\ \check{Z} (\text{věk } 30-60): & 0,034 \times \text{váha (kg)} + 0,006 \times \text{výška (m)} + 3,530 \text{ [MJ/den]} \\ \check{Z} (\text{věk} > 60): & 0,033 \times \text{váha (kg)} + 1,917 \times \text{výška (m)} + 0,074 \text{ [MJ/den]} \text{ [22]} \end{aligned}$$

Schofield odvodil rovnici z 6 skupin. První skupina obsahovala 7 173 jedinců. Druhá skupina byla tvořena z 1 239 žen a 3 575 mužů ve věku starších 18 let. Třetí skupina byla tvořena z 3 388 Italů. Čtvrtá skupina byla tvořena z 615 osob, které žili v tropech. Pátá skupina byla tvořena z 322 Indů. Šestá skupina byla tvořena z 7 173 Evropanů. Průměrná hodnota BMI jedinců ze všech skupin se pohybovala od 21 do 24. [22]

- **Livingstonova a Kohlstadtova rovnice**

Livingstonova a Kohlstadtova rovnice počítá s věkem a váhou dané osoby. Rovnice je zvláště pro muže a ženy.

$$\begin{aligned} M: & 293 \times \text{váha}^{0,4330} (\text{kg}) - 5,92 \times \text{věk} \text{ [kcal/den]} \\ \check{Z}: & 248 \times \text{váha}^{0,4356} (\text{kg}) - 5,09 \times \text{věk} \text{ [kcal/den]} \text{ [21]} \end{aligned}$$

Rovnice byla odvozena z 327 pacientů a ze souborů, které byly zjištěny při odvozování Harris-Benedictovy rovnice a Owenovy rovnice. Při studii byly zkoumané tři parametry, tělesná váha, výška a věk. U těchto parametrů se zkoumala jejich důležitost a vliv na výslednou hodnotu. [21]

Tabulka 1.7 Podmínky nepřímé kalorimetrie pro Livingstonovu studii, převzato [33]

Přístroj, kterým bylo provedeno měření	Doba na lůžku před měřením
Sensormedics	20 minut
Byla prováděna kalibrace přístroje	Délka měření
Ne	Neurčena
Doba půstu před měřením	Teplota v místnosti, kde probíhalo měření
12 hodin	Neurčena
Omezení před měřením	Rovnovážený stav byl definovaný
Žádné cvičení	Ne

- **FAO**

Rovnice odvozená od Organizace pro výživu a zemědělství. Rovnice byly publikovány v roce 1957. Rovnice jsou rozděleny podle pohlaví a také podle věku. Ve všech případech je výsledná hodnota rovnic udávána v kcal za jeden den. V první variantě rovnic vybereme věkový interval, do kterého daná osoba spadá a poté do rovnice dosazujeme pouze tělesnou váhu v kilogramech. [23]

$$\begin{aligned}M (\text{věk } 18-30): & 15,3 \times \text{váha (kg)} + 679 \text{ [kcal/den]} \\M (\text{věk } 30-60): & 11,6 \times \text{váha (kg)} + 879 \text{ [kcal/den]} \\M (\text{věk } >60): & 13,5 \times \text{váha (kg)} + 487 \text{ [kcal/den]} \\Ž (\text{věk } 18-30): & 14,7 \times \text{váha (kg)} + 496 \text{ [kcal/den]} \\Ž (\text{věk } 30-60): & 8,7 \times \text{váha (kg)} + 829 \text{ [kcal/den]} \\M (\text{věk } >60): & 10,5 \times \text{váha (kg)} + 596 \text{ [kcal/den]} \text{ [23]}\end{aligned}$$

Ve druhé variantě rovnic vybíráme stejně jako u první varianty věkový interval a poté do rovnice dosazujeme tělesnou váhu v kilogramech a výšku v metrech.

$$\begin{aligned}M (\text{věk } 18-30): & 15,4 \times \text{váha (kg)} - 27 \times \text{výška (m)} + 717 \text{ [kcal/den]} \\M (\text{věk } 30-60): & 11,3 \times \text{váha (kg)} - 16 \times \text{výška (m)} + 901 \text{ [kcal/den]} \\M (\text{věk } >60): & 8,8 \times \text{váha (kg)} - 1128 \times \text{výška (m)} + 1071 \text{ [kcal/den]} \\Ž (\text{věk } 18-30): & 13,3 \times \text{váha (kg)} - 334 \times \text{výška (m)} + 35 \text{ [kcal/den]} \\Ž (\text{věk } 30-60): & 8,7 \times \text{váha (kg)} - 25 \times \text{výška (m)} + 865 \text{ [kcal/den]} \\Ž (\text{věk } >60): & 9,2 \times \text{váha (kg)} - 637 \times \text{výška (m)} + 302 \text{ [kcal/den]} \text{ [23]}\end{aligned}$$

Rovnice jsou založené na Schofieldově studii. Databáze měřených subjektů byla rozšířena na přibližně 11 000. [23]

- **Henryho rovnice**

Henryho rovnice jsou také kategorizovány podle věku. Výsledné hodnoty jsou udávány v MJ za jeden den. První šestice rovnic počítá pouze s tělesnou váhou dané osoby.

Původní studie pro odvození této rovnice se zúčastnilo 10 552 jedinců, z čehož bylo 4 702 žen a 5 794 mužů. [24]

$$\begin{aligned}M (\text{věk } 18-30): & 0,0669 \times \text{váha (kg)} + 2,28 \text{ [MJ/den]} \\M (\text{věk } 30-60): & 0,0592 \times \text{váha (kg)} + 2,48 \text{ [MJ/den]} \\M (\text{věk } >60): & 0,0563 \times \text{váha (kg)} + 2,15 \text{ [MJ/den]} \\Ž (\text{věk } 18-30): & 0,0546 \times \text{váha (kg)} + 2,33 \text{ [MJ/den]} \\Ž (\text{věk } 30-60): & 0,0407 \times \text{váha (kg)} + 2,9 \text{ [MJ/den]} \\Ž (\text{věk } >60): & 0,0424 \times \text{váha (kg)} + 2,38 \text{ [MJ/den]} \text{ [24]}\end{aligned}$$

Druhá šestice rovnic počítá s tělesnou váhou a výškou dané osoby.

$$M \text{ (věk 18-30): } 0,06 \times \text{váha (kg)} + 1,31 \times \text{výška (m)} + 0,473 \text{ [MJ/den]}$$

$$M \text{ (věk 30-60): } 0,0476 \times \text{váha (kg)} + 2,26 \times \text{výška (m)} + 0,574 \text{ [MJ/den]}$$

$$M \text{ (věk >60): } 0,0478 \times \text{váha (kg)} + 2,26 \times \text{výška (m)} + 1,07 \text{ [MJ/den]}$$

$$\check{Z} \text{ (věk 18-30): } 0,0433 \times \text{váha (kg)} + 2,57 \times \text{výška (m)} + 1,18 \text{ [MJ/den]}$$

$$\check{Z} \text{ (věk 30-60): } 0,0342 \times \text{váha (kg)} + 2,1 \times \text{výška (m)} + 0,0486 \text{ [MJ/den]}$$

$$\check{Z} \text{ (věk >60): } 0,0356 \times \text{váha (kg)} + 1,76 \times \text{výška (m)} + 0,0448 \text{ [MJ/den]} \text{ [24]}$$

- **Müllerova rovnice**

Müllerova rovnice má mnoho úprav. Existují obecné varianty, varianta zohledňující FFM a FM, varianta zohledňující BMI a varianta, která zohledňuje zároveň jak BMI, tak i hodnoty FFM a FM. Výsledné hodnoty rovnic se udávají v MJ za jeden den. [25]

Obecná Müllerova rovnice počítá s tělesnou váhou, věkem a pohlavím. V rovnici dosazujeme za pohlaví, pro muže hodnotu 1 a pro ženy 0. Rovnice je stejná jak pro ženy, tak i pro muže, liší se pouze dosazenou hodnotou za „pohlaví“.

$$M/\check{Z}: 0,047 \times \text{váha (kg)} - 0,01452 \times \text{věk} + 1,009 \times \text{pohlaví} + 3,21 \text{ [MJ/den]} \text{ [25]}$$

Müllerovi rovnice zahrnující BMI jsou dvě. Jedna pro osoby s BMI od 25 do 30 a druhá pro osoby s BMI větším jak 30. Rovnice počítají s tělesnou váhou, věkem a pohlavím. Do rovnice za pohlaví opět dosazujeme 1 pro muže a 0 pro ženy.

$$BMI \text{ (25-30): } 0,04507 \times \text{váha (kg)} - 0,01553 \times \text{věk} + 1,006 \times \text{pohlaví} + 3,407 \text{ [MJ/den]}$$

$$BMI > 30: 0,05 \times \text{váha (kg)} - 0,01586 \times \text{věk} + 1,103 \times \text{pohlaví} + 2,924 \text{ [MJ/den]} \text{ [25]}$$

Müllerova rovnice s FFM a FM. Do rovnice dosazujeme hodnoty FFM a FM, věk a pohlaví, kde za pohlaví opět dosazujeme 0 nebo 1.

$$M/\check{Z}: 0,05192 \times FFM + 0,04036 \times FM + 0,869 \times \text{pohlaví} - 0,01181 \times \text{věk} + 2,992 \text{ [MJ/den]} \text{ [25]}$$

Müllerova rovnice zohledňující BMI, FFM a FM. Rovnice jsou rozděleny na dvě podle hodnoty BMI dané osoby.

$$BMI \text{ (25-30): } 0,03776 \times FFM + 0,03013 \times FM + 0,93 \times \text{pohlaví} - 0,01196 \times \text{věk} + 3,928 \text{ [MJ/den]} \text{ [25]}$$

$BMI > 30: 0,05685 \times FFM + 0,04022 \times FM + 0,808 \times \text{pohlaví} - 0,01402 \times \text{věk} + 2,818$
[MJ/den] [25]

Müllerova rovnice byla odvozena na 2 528 subjektech, z nichž bylo 1 027 mužů a 1501 žen. Věk sledovaných osob se pohyboval od 5 až do 80 let a průměrná hodnota BMI byla 27. [25]

Tabulka 1.8 Podmínky nepřímé kalorimetrie pro Müllerovu studii, převzato [33]

Přístroj, kterým bylo provedeno měření	Doba na lůžku před měřením
Deltatrac, Beckman a metabolická komora	Více jak 15 minut
Byla prováděna kalibrace přístroje	Délka měření
Ne	Více jak 20 minut
Doba půstu před měřením	Teplota v místnosti, kde probíhalo měření
Více jak 8 hodin	Nedefinována
Omezení před měřením	Rovnovážný stav byl definovaný
Žádné omezení	Ne

- **Korthova rovnice**

Výsledná hodnota Korthovy rovnice se udává v kJ za jeden den. Obě Korthovy rovnice jsou univerzální pro muže i ženy. Do rovnice dosazujeme hodnoty tělesné váhy, výšky, věku a pohlaví. Do rovnice za pohlaví dosazujeme 1 pro muže a 0 pro ženy. [26]

$M/\text{Ž}: 41,5 \times \text{váha (kg)} + 35,0 \times \text{výška (cm)} + 1107,4 \times \text{pohlaví} - 19,1 \times \text{věk} - 1731,2$
[kJ/den] [26]

Do druhé Korthovy rovnice dosazujeme pouze hodnotu FFM.

$M/\text{Ž}: 108,1 \times FFM + 1231$ [kJ/den] [26]

Korthova rovnice byla odvozena na 104 subjektech z nichž bylo 50 mužů a 54 žen. Věk sledovaných osob se pohyboval od 21 až do 68 let a průměrná hodnota BMI byla 26. [26]

Tabulka 1.9 Podmínky nepřímé kalorimetrie pro Korthovu studii, převzato [33]

Přístroj, kterým bylo provedeno měření	Doba na lůžku před měřením
Vmax a Sensormedics	Neurčena
Byla prováděna kalibrace přístroje	Délka měření
Ano	Více jak 30 minut
Doba půstu před měřením	Teplota v místnosti, kde probíhalo měření
Přes noc	Konstantní
Omezení před měřením	Rovnovážný stav byl definovaný
Žádné omezení	Ano

- **De Lorenzova rovnice**

De Lorenzova rovnice je zvlášť pro ženy a muže. Do rovnice dosazujeme tělesnou hmotnost v kilogramech, výšku v centimetrech a věk. Výsledná hodnota rovnice je udávána v kJ za jeden den. [27]

$$M: 53,284 \times \text{váha (kg)} + 20,957 \times \text{výška (cm)} - 23,859 \times \text{věk} + 487 \text{ [kJ/den]}$$

$$Ž: 46,322 \times \text{váha (kg)} + 15,744 \times \text{výška (cm)} - 16,66 \times \text{věk} + 944 \text{ [kJ/den]} \text{ [27]}$$

De Lorenzo odvodil rovnici na 320 subjektech, z nichž bylo 127 mužů a 193 žen. Věk sledovaných osob se pohyboval od 18 až do 59 let a průměrná hodnota BMI byla 27. [27]

Tabulka 1.10 Podmínky nepřímé kalorimetrie pro De Lorenzovu studii, převzato [33]

Přístroj, kterým bylo provedeno měření	Doba na lůžku před měřením
Sensormedics maska na obličej	25-30 minut
Byla prováděna kalibrace přístroje	Délka měření
Ano	30 minut v tiché místnosti
Doba půstu před měřením	Teplota v místnosti, kde probíhalo měření
Nedefinovaná	22 °C
Omezení před měřením	Rovnovážný stav byl definovaný
Žádné omezení	Ano

- **Lazzerova rovnice**

Lazzerova rovnice je separována pro ženy a muže. Lazzerovy rovnice počítají s tělesnou váhou v kilogramech, s výškou v centimetrech a s věkem dané osoby, nebo s hodnotami FFM, FM a s věkem pouze u rovnice pro muže. Výsledná hodnota je udávána v MJ za jeden den. [28]

$$M: 0,048 \times \text{váha (kg)} + 4,655 \times \text{výška (m)} - 0,020 \times \text{věk} - 3,605 \text{ [MJ/den]}$$

$$Ž: 0,042 \times \text{váha (kg)} + 3,619 \times \text{výška (m)} - 2,678 \text{ [MJ/den]} \text{ [28]}$$

Lazzerova rovnice uvažující FFM a FM:

$$M: 0,081 \times \text{FFM} + 0,049 \times \text{FM} - 0,019 \times \text{věk} - 2,194 \text{ [MJ/den]}$$

$$Ž: 0,067 \times \text{FFM} + 0,046 \times \text{FM} + 1,568 \text{ [MJ/den]} \text{ [28]}$$

Lazzerovy studie se účastnilo 346 osob, z nichž bylo 164 těžce obézních mužů a 182 obézních žen. Měření bylo prováděno nepřímou kalorimetrií a měřením složení těla pomocí bioelektrické analýzy. [29]

Tabulka 1.11 Podmínky nepřímé kalorimetrie pro Lazzerovu studii, převzato [33]

Přístroj, kterým bylo provedeno měření	Doba na lůžku před měřením
Hood Vmax 29 Sensormedics	20 minut
Byla prováděna kalibrace přístroje	Délka měření
Ano	30 minut, prvních 5-10 minut nehodnocených
Doba půstu před měřením	Teplota v místnosti, kde probíhalo měření
Nedefinována	Nedefinovaná
Omezení před měřením	Rovnovážený stav byl definovaný
Žádné omezení	Ano

- **Huangova rovnice**

Huangova rovnice je ve dvou variantách. Rovnice jsou univerzální, jak pro muže, tak i pro ženy. V první variantě se počítá s tělesnou váhou v kilogramech, výškou v centimetrech, věkem a pohlavím, kde pohlaví má pro muže hodnotu 1 a pro ženy hodnotu 0. Výsledná hodnota se udává u obou variant v kcal za jeden den. [30]

$M/\bar{Z}: 10,158 \times \text{váha (kg)} + 3,933 \times \text{výška (cm)} - 1,44 \times \text{věk} + 273,821 \times \text{pohlaví} + 60,655$ [kcal/den] [30]

Ve druhé variantě rovnice uvažuje hodnoty FFM, FM, věk a pohlaví.

$M/\bar{Z}: 14,118 \times \text{FFM} + 9,367 \times \text{FM} - 1,515 \times \text{věk} + 220,863 \times \text{pohlaví} + 521,995$ [kcal/den] [30]

Výzkum byl založen na zkoumání 1088 dospělých obézních lidí, z nichž bylo 279 mužů a 759 žen. Ze zkoumaného vzorku bylo 142 lidí diagnostikováno s diabetem. Mužů s diabetem bylo 61 a žen 81. Průměrný věk diabetiků byl 52 let. Průměrný věk lidí bez diabetu byl 44 let. BMI u všech sledovaných objektů byl vyšší jak 35. Měření bylo prováděno pomocí nepřímé kalorimetrie a bylo provedeno několik vícerozměrných lineárních regresních modelů s použitím věku, pohlaví, hmotnosti, výšky, BMI, tukové hmoty, procenta tukové hmoty a bez tukové hmoty jako nezávislých proměnných. [30]

Tabulka 1.12 Podmínky nepřímé kalorimetrie pro Huangovu studii, převzato [33]

Přístroj, kterým bylo provedeno měření	Doba na lůžku před měřením
Deltatrac hood	Nedefinovaná
Byla prováděna kalibrace přístroje	Délka měření
Ano	40 minut
Doba půstu před měřením	Teplota v místnosti, kde probíhalo měření
Přes noc	Nedefinovaná
Omezení před měřením	Rovnovážený stav byl definovaný
Žádné cvičení, kouření a žádná káva	Ne

- **Johnstoneova rovnice**

Johnstoneova rovnice je univerzální pro muže i pro ženy. Do rovnice dosazujeme hodnotu FFM, FM a věku. Výsledná hodnota této rovnice se udává v kJ za jeden den.

$$M/\text{Ž}: 90,2 \times FFM + 31,6 \times FM - 12,2 \times \text{věk} + 1613 \text{ [kJ/den]} \text{ [31]}$$

Studie byla provedena na 150 osobách, z nichž bylo 43 mužů a 107 žen. Věk pozorovaných osob se pohyboval od 21 do 64 let a hodnota BMI se pohybovala od 17 do 49. Z celkového počtu sledovaných osob bylo 54 % s nadváhou nebo obezitou. [31]

Tabulka 1.13 Podmínky nepřímé kalorimetrie pro Johnstoneovu studii, převzato [33]

Přístroj, kterým bylo provedeno měření	Doba na lůžku před měřením
Hood Deltatrac II (rovnice Elia a Livesay)	30 minut
Byla prováděna kalibrace přístroje	Délka měření
Ne	30-40 minut
Doba půstu před měřením	Teplota v místnosti, kde probíhalo měření
Přes noc	Neutrální
Omezení před měřením	Rovnovážný stav byl definovaný
Žádné omezení	Ano, 15 minut

- **Faustův vzorec**

Faustův vzorec počítá pouze s tělesnou váhou měřené osoby. Rovnice je separována pro muže a ženy. Vypočtená hodnota z rovnice se udává v kcal za jeden den. [46]

$$M: 24 \times \text{váha (kg)} \text{ [kcal/den]}$$

$$\text{Ž}: 23 \times \text{váha (kg)} \text{ [kcal/den]} \text{ [46]}$$

- **Cunninghamova rovnice**

Cunninghamova rovnice počítá s FFM a je vhodná pro sportující jedince.

$$M/\text{Ž}: 500 + 22 \times FFM \text{ [kcal/den]} \text{ [47]}$$

- **Katch-McArdlerova rovnice**

Katch-McArdlerova rovnice počítá s FFM. Využívá ji k predikci RMR InBody 770.

$$M/\text{Ž}: 370 + 21,6 \times FFM \text{ [kcal/den]} \text{ [48]}$$

- **Garrova rovnice**

Stejně jako Cunninghamova rovnice slouží pro výpočet klidového metabolismu.

$$M/\text{Ž}: 441 + 21,9 \times FFM - 2,4 \times \text{věk} \text{ [kcal/den]} \text{ [49]}$$

2. PRAKTICKÁ ČÁST

2.1 Cíle práce

- **Cíl 1**

Zjistit, o kolik kcal za jeden den se liší klidový energetický výdej u žen ve srovnání s muži.

- **Cíl 2**

Hlavním cílem práce bylo provést validaci hodnot RMR vypočtených pomocí prediktivních rovnic s naměřenými hodnotami RMR pomocí nepřímé kalorimetrie přístrojem CORTEX MetaLyzer® 3B.

Pro srovnání prediktivních rovnic s měřením nepřímé kalorimetrie budou zvoleny různé statistické přístupy, aby výsledky byly ověřené z více hledisek. Ve všech statistických přístupech považujeme hodnoty získané nepřímou kalorimetrií za zlatý standard.

- **Cíl 3**

Jestliže dostupné prediktivní rovnice pro určení klidového energetického výdeje, budou pro můj datový soubor osob nedostačující, například když budou hodnoty klidového energetického výdeje podhodnocovat nebo nadhodnocovat, tak zvolím vlastní postup odvození rovnice pro můj datový soubor osob.

- **Cíl 4**

Posledním cílem bude vytvořit vlastní postup pro predikci klidového energetického výdeje pomocí strojového učení.

2.2 Metodika

2.2.1 Postup měření

Samotná měření se konala v laboratoři CESA (Centrum sportovních aktivit) v zimním semestru 2020/2021. Byl hodnocen klidový energetický výdej pomocí nepřímé kalorimetrie (MetaLyzer® 3B, CPET systém CORTEX; program Meta-Soft®Studio pro CPET CORTEX). Přístroj CORTEX MetaLyzer® 3B slouží k provádění spiroergometrických testů, jehož cílem je hodnocení výkonnosti daného jedince.

Měření probíhalo v uzavřené místnosti, ve které byla teplota okolo 22°C. Místnost byla přizpůsobena tak, aby nedocházelo k vnějším vlivům, které by negativně ovlivnily měření. Před zahájením měření byly každé měřené osobě sděleny podmínky, které musely být dodrženy. Měřená osoba musela být na lačno minimálně 12 hodin do začátku měření. Před měřením měřená osoba nesměla minimálně 12 hodin do začátku měření požit žádný alkohol, nápoje obsahující kofein a výrobky obsahující nikotin. Měřená osoba nesměla požit 24 hodin před měřením jídlo obsahující nadměrné množství bílkovin.

V první řadě byla měřená osoba zvážena, poté byla změřena její tělesná výška a otázel jsem se na věk. Tělesná váha, výška a věk byly parametry sloužící pro výpočet klidového energetického výdeje pomocí nepřímé kalorimetrie, avšak tyto parametry nerozhodovaly o výkonnosti daného jedince. Před začátkem měření bylo nutné provést kalibraci přístroje. Kalibrace přístroje spočívala v kalibraci plynů, objemů a tlaků. Na samém začátku měření byli účastníci měření instruováni, aby leželi na lehátku po dobu 15 minut, kdy se měřená osoba bude snažit dostat do co největšího fyzického i psychického klidu. Po 15 minutách ležení na lehátku byla měřené osobě nasazena maska, která směřovala vdechovaný kyslík a vydechovaný oxid uhličitý do jednoho bodu (vyústění masky). V tomto bodě byl do masky vsunut snímač průtoku vzduchu. Snímač průtoku vzduchu měl v sobě zabudovanou hadičku, na jejímž konci byl konektor, který sloužil pro odběr vzorků plynu.

Jakmile byly splněny všechny podmínky, došlo k samotnému měření. Měřená osoba musela ležet v klidu a nemluvit po dobu potřebnou pro ukončení měření. V programu jsem nastavil časový interval na 5 minut, což znamená, že když bude ustálená spotřeba kyslíku ($\pm 5\%$), ustálený výdej oxidu uhličitého ($\pm 5\%$) a ustálená hodnota respiračního kvocientu ($\pm 10\%$) v právě probíhajících pěti minutách, tak program samostatně ukončí a vyhodnotí měření. To znamená, že pacient je momentálně v takzvaném setrvalém stavu po dobu minimálně 5 minut.

Přístroj měřil každých 7 sekund aktuální hodnotu spotřeby kyslíku, výdeje oxidu uhličitého a dopočítával respirační kvocient z těchto dvou hodnot. Na základě těchto tří hodnot přístroj vyhodnotil klidový energetický výdej. Výsledná hodnota klidového energetického výdeje byla vypočtena pomocí Weirovi rovnice (uvedené v kapitole 1.3.1), do které byly dosazeny průměrné hodnoty spotřeby O_2 a výdeje CO_2 , které byly vypočteny z hodnot, které spadaly do intervalu setrvalého stavu. Pokud program během 30 minut nenašel setrvalý stav, tak jsem manuálně našel 5-ti minutový interval, který se nejvíce blížil setrvalému stavu nebo jsem použil můj vlastní program (viz kapitola 2.3).

2.2.2 Výzkumný soubor

Pomocí nepřímé kalorimetrie byl u 22 jedinců naměřen energetický klidový výdej. Z těchto naměřených osob bylo 14 mužů a 8 žen. Věkové rozmezí osob v mém datovém souboru bylo 20-56 let. V mém datovém souboru se vyskytovaly 4 obézní osoby, ostatních 18 osob mělo normální váhu.

2.2.3 Statistická analýza

Popisné charakteristiky sledovaných veličin jsou uvedeny jako průměr \pm SD, pokud není uvedeno jinak. Pro meziskupinové porovnání rozložení sledovaných veličin (mezi ženami a muži) jsem použil Mannův-Whitneyův test a dvouvýběrový nepárový Studentův test.

Pro srovnání prediktivních rovnic s měřenou hodnotou klidového energetického výdeje (nepřímá kalorimetrie) jsem použil čtyři statistické přístupy, aby výsledky byly ověřeny více metodami. Jako první statistický přístup jsem zvolil procentuální srovnání, které nám říká o kolik procent se v průměru liší predikce rovnicemi oproti naměřené hodnotě klidového energetického výdeje. Jako druhý statistický přístup jsem zvolil korelační analýzu pro zjištění míry a významnosti vztahů mezi hodnotami klidového energetického výdeje určenými pomocí nepřímé kalorimetrie a hodnotami vypočítanými z prediktivních rovnic. Jako třetí statistický přístup jsem zvolil dvouvýběrový párový Studentův test, který umožní porovnat predikované hodnoty RMR (z rovnic) a naměřené hodnoty RMR (pomocí nepřímé kalorimetrie). Jako čtvrtý a poslední statistický přístup jsem zvolil Bland-Altmanův graf neboli rozdílový graf, který slouží k hodnocení rozdílnosti mezi predikovanými hodnotami (prediktivní rovnice) a měřenými hodnotami (nepřímá kalorimetrie) RMR.

Pro odvození vlastní prediktivní rovnice a pro sledování vlivu pohlaví na RMR jsem využil lineární regresní model. Model byl vybudován s použitím metody vzestupného výběru (forward stepwise metoda). Pro stanovení statistické významnosti modelu jsem použil F-test. Dále jsem pro vytvoření vlastního postupu pro predikci RMR využil neuronovou síť, kde výsledky testování jsem porovnal s měřenými hodnotami RMR na základě procentuálního srovnání.

Pro účely statistického testování byla stanovena hladina významnosti na hodnotu 0,05. To znamená, že za statisticky významné výsledky budu považovat takové, pro něž je p-hodnota menší než 0,05.

Veškerá statistická analýza byla provedena prostřednictvím programu MATLAB R2018b, statistického programu GRETL 2021b a programu Rstudio 4.1.0.

2.3 Popis datového souboru

Pro všechny měřené osoby byly vypočteny prediktivní rovnice. V prediktivních rovnicích bylo počítáno s šesti parametry lidského těla. Věk byl zjištěn na základě dotazníku, který byl měřené osobě podán na vyplnění před samotným měřením. Váha (neboli tělesná hmotnost), FFM (tělesná hmotnost bez tuku) a FM (množství tukové hmoty z celkové tělesné hmotnosti) byly predikovány pomocí přístroje InBody. Výška měřené osoby byla naměřena pomocí výškoměru, na kterém se provedly tři měření, které byly následně zprůměrované. Hodnota BMI byla vypočtena z jejího definitivního vztahu.

Rovnice FFM, FM a BMI, dle kterých predikuje výsledné hodnoty těchto parametrů přístroj InBody:

$$FFM = TBW / k \text{ [kg]}$$

$$FM = \text{tělesná hmotnost} - FFM \text{ [kg]}$$

$$BMI = \text{tělesná hmotnost} / \text{výška}^2 \text{ [kg/m}^2\text{]}$$

TBW představuje množství vody v organismu, tato hodnota je predikována přístrojem InBody. Konstanta „k“ je 0,73, protože tělesná tkáň bez tuku u zdravého organismu obsahuje 73 % vody. Stanovená konstanta „k“ platí pro každou osobu bez ohledu na lidskou rasu a pohlaví.

- **Analýza tělesného složení u měřené skupiny**

Popisné charakteristiky studovaného souboru se nachází v tabulce 2.1 a tato tabulka obsahuje též výsledky porovnání rozložení hodnot mezi skupinami žen a mužů.

Tabulka 2.1 Analýza tělesného složení u měřené skupiny

	Věk ±SD	Váha ±SD	Výška ±SD	FFM ±SD	FM ±SD	BMI ±SD
	[1]	[kg]	[cm]	[kg]	[kg]	[kg/m ²]
Muži (n=14)	27,6±10,8	83,1±10,9	182,0±6,8	69,1±6,9	14,0±7,5	25,4±3,6
Ženy (n=8)	38,2±11,1	70,4±14,3	167,9±6,7	49,8±5,6	20,6±10,1	24,6±4,3
p-hodnota	0,0259	0,0230	0,0001	<0,0001	0,0942	0,5360
Test	M-W	t-test	t-test	t-test	t-test	M-W

V tabulce 2.1 zkratka M-W vyjadřuje Mannův-Whitneyův test a „t-test“ představuje dvouvýběrový nepárový Studentův test. Lze si všimnout, že obě skupiny nejsou zcela homogenní. To je zapříčiněno především věkem, váhou, výškou a FFM. V tabulce 2.1 je vidět, že muži a ženy se statisticky významně liší ve věku, váze, výšce a FFM. Rozdíly ve FM a BMI nejsou mezi ženami a muži statisticky významné.

- **Naměřené hodnoty RMR pomocí nepřímé kalorimetrie**

V důsledku, že každá osoba nedosáhla setrvalého stavu (5 minut) po dobu měření, které trvalo 30 minut, tak jsem vytvořil program, který analyzoval jednotlivé křivky (VO_2 , VCO_2 a RQ) a našel 5-ti minutový interval, který se nejvíce blížil setrvalému stavu. Můj program jsem otestoval na osobách, kterým přístroj našel setrvalý stav a vyhodnotil RMR. Úspěšnost tohoto programu ve srovnání s osobami, kterým přístroj vyhodnotil RMR, byla $98,8 \pm 6,1$ %. Tento program jsem použil u osob, kterým přístroj vyhodnotil hodnoty RMR jako „NaN“, což bylo zapříčiněno právě nedosažením setrvalého stavu.

- **Vypočtené hodnoty klidového metabolismu pomocí prediktivních rovnic**

Celkem bylo použito 32 prediktivních rovnic pro určení RMR u všech měřených osob. Vlastním měřením pomocí přístroje InBody 770 byla též predikována hodnota RMR. Predikce RMR přístrojem InBody 770 měla být též srovnávána s měřenou hodnotou (nepřímá kalorimetrie). Přístroj InBody 770 predikuje hodnotu RMR na základě Katch-McArdlerovi rovnice. Z tohoto důvodu v kapitole 2.6 bude uvedena pouze Katch-McArdlerova prediktivní rovnice, jejíž výsledky budou tedy rovny přístroji InBody 770.

Všechny prediktivní rovnice byly vypočítány prostřednictvím programu MATLAB R2018b.

Tabulka 2.2 Vypočítané hodnoty klidového energetického výdeje

	Průměr \pm SD		Průměr \pm SD
Přehled jednotlivých rovnic	[kcal/den]	Přehled jednotlivých rovnic	[kcal/den]
Nepřímá kalorimetrie	2164 \pm 483	Lazzerova rovnice s FFM	1718 \pm 438
Korthova rovnice s FFM	1897 \pm 427	InBody*	1710 \pm 357
Korthova rovnice	1868 \pm 453	Katch-McArdle rovnice*	1710 \pm 357
Cunninghamova rovnice	1865 \pm 364	Garrowa rovnice	1704 \pm 383
Bernsteinova rovnice FFM 1	1859 \pm 328	Henryho rovnice (výška)	1695 \pm 380
Faustův vzorec	1857 \pm 486	Müllerova rovnice	1694 \pm 361
Lazzerova rovnice	1841 \pm 398	Henryho rovnice (váha)	1687 \pm 397
Müllerova rovnice BMI <30	1833 \pm 180	Huangova rovnice	1682 \pm 386
Müllerova rovnice BMI >30	1820 \pm 182	Mifflinova rovnice	1679 \pm 372
De Lorenzova rovnice	1767 \pm 391	Müllerova rovnice s FFM	1676 \pm 341
Schofieldova rovnice (výška)	1763 \pm 418	L a K rovnice	1659 \pm 361
Harris-Benedict rovnice	1761 \pm 408	Huangova rovnice s FFM	1645 \pm 374
Harris-Benedict rovnice (re.)	1760 \pm 381	Owenova rovnice s FFM	1643 \pm 418
Johnstoneova rovnice	1755 \pm 375	Mifflinova rovnice s FFM	1635 \pm 326
FAO (pouze váha)	1753 \pm 409	Owenova rovnice	1571 \pm 341
FAO (výška a váha)	1753 \pm 392	Bernsteinova rovnice	1440 \pm 352
Schofieldova rovnice (váha)	1746 \pm 400	Bernsteinova rovnice FFM 2	1429 \pm 323

Z tabulky 2.2 můžeme vidět, že predikce RMR přístrojem InBody a Katch-McArdlerovou rovnicí je rovna (označeny *).

2.4 Vliv pohlaví na klidový energetický výdej

Byl sledován vliv pohlaví na RMR. Pro srovnání RMR mezi muži a ženami jsem použil lineární regresní model, v němž byl zároveň zohledněn vliv věku, a to v důsledku nehomogenity datového souboru.

- **Lineární regrese**

Lineární regrese je matematická metoda, která se využívá k proložení souboru bodů v grafu přímkou. Model lineární regrese můžeme vyjádřit jako:

$y = \beta X + \varepsilon$, kde y je sloupcový vektor pozorování vysvětlované proměnné o rozměrech $n \times 1$, ε je vektor náhodných reziduálních veličin o rozměrech $n \times 1$, β je sloupcový vektor neznámých parametrů o rozměrech $p \times 1$ a X je matice pozorování k nezávisle proměnných o rozměrech $n \times p$ pro $p = k + 1$. [43]

Nejčastěji využívanou metodou k odhadování koeficientů lineárního regresního modelu je metoda nejmenších čtverců. Výhodou metody nejmenších čtverců oproti jiným metodám je její jednoduchost a výpočetní nenáročnost. Při splnění základních předpokladů metoda nejmenších čtverců vytváří odhady regresních koeficientů s optimálními vlastnostmi i pro náhodné výběry malého rozsahu. [43]

Lineární regresní model v koeficientech lze zapsat jako:

$Y_i = \beta_0 + \beta_1 f_1(X_{1i}) + \beta_2 f_2(X_{2i}) + \dots + \beta_k f_k(X_{ki}) + \varepsilon_i$, kde $i = 1, \dots, n$, Y je vysvětlovaná proměnná, β_1, \dots, β_k jsou koeficienty, X_1, \dots, X_k jsou nezávislé proměnné, f_1, \dots, f_k jsou libovolné funkce a ε_i je chybový člen. [43]

Podstatou bodového odhadu je určit vhodnou funkci pozorování Y při známé matici pozorování vysvětlujících proměnných (regresorů) X , abychom získali co nejlepší odhady neznámých parametrů modelu. Metoda nejmenších čtverců hledá současně odhady neznámých koeficientů β tak, že minimalizuje součet čtverců reziduí vzhledem k numerickým hodnotám těchto koeficientů. [43]

- **Koeficient determinace**

Koeficient determinace udává míru kvality regresního modelu. Koeficient determinace nabývá hodnot 0 až 1, kde 1 znamená dokonalou predikci hodnot závislé proměnné a naopak 0 znamená, že model nepřináší pro poznání závislé proměnné žádnou informaci, tudíž je model pro použití v praxi neúčinný. [44]

- **F-test**

Pro testování statistické významnosti lineárního regresního modelu jsem použil F-test. Tento test porovnává variabilitu závislé proměnné a reziduální variabilitu určenou daným

modelem. Též se dá říct, že pomocí F-testu porovnáváme daný model s modelem nulovým (tj. takovým, v němž figuruje pouze absolutní člen). Testovací statistika se řídí Fisherovým-Snedecorovým rozdělením s k a $n-k-1$ stupni volnosti, kde k je počet regresních parametrů a n je počet sledovaných objektů. Je-li hodnota F-testu větší než tabulková hodnota kvantilu $F_{1-\alpha}(k, n-k-1)$ zamítáme nulovou hypotézu H_0 o statistické nevýznamnosti a model je tedy statisticky významný. Je-li hodnota F-testu menší než tabulková hodnota kvantilu $F_{1-\alpha}(k, n-k-1)$ nezamítáme nulovou hypotézu H_0 a model je tedy statisticky nevýznamně odlišný od nulového modelu. [45]

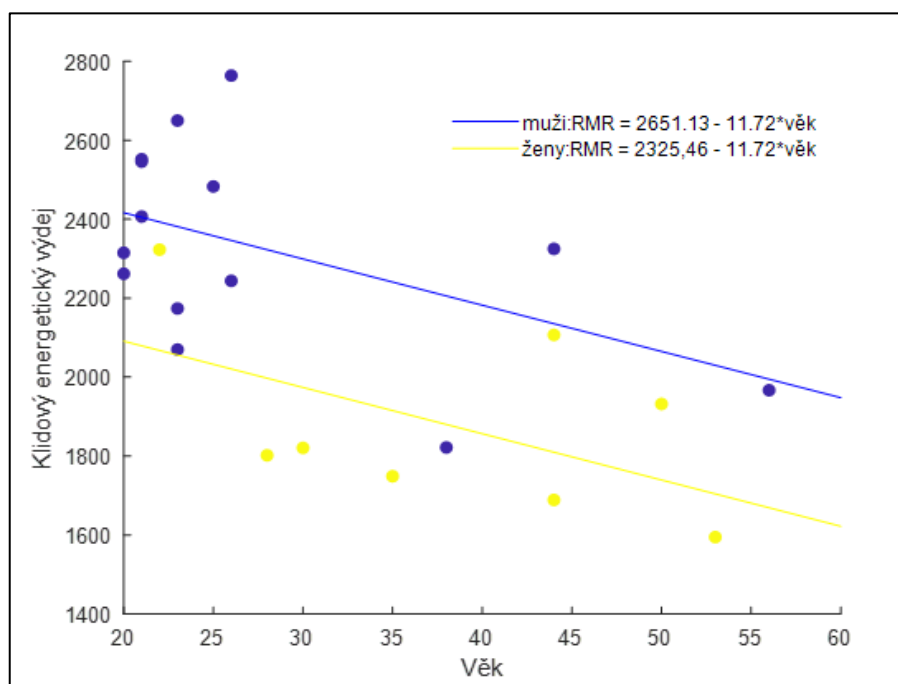
- **Model vysvětlující vliv pohlaví na klidový energetický výdej**

$$RMR = 2651,13 - 325,67 \times \text{pohlaví} - 11,72 \times \text{věk}$$

(pohlaví v tomto modelu nabývá hodnoty 0 pro muže a 1 pro ženy)

Na základě tohoto lineárního regresního modelu, se podařilo vysvětlit vliv pohlaví na RMR vzhledem k věku dané osoby. Tento model nám říká, že ženy vzhledem k věku mají RMR v průměru nižší o 325,67 kcal za jeden den. Hodnota tohoto rozdílu je statisticky významná (tj. statisticky významně odlišná od nuly).

Další parametry modelu jsou následující. Směrodatná chyba regrese představuje míru rozptýlení pozorovaných hodnot okolo regresní přímky, a její hodnota pro tento model je 227. Koeficient determinace je pro tento model 0,58. Mohu tedy říct, že tomuto modelu se podařilo vysvětlit 58 % variability závislé proměnné. Tento model jako celek je statisticky významný ($F(2,19)=13,2$; $p = 0,0003$).



Obrázek 2.1 Grafické znázornění vysvětlující vliv pohlaví na RMR zohledňující věk

2.5 Srovnání prediktivních rovnic s měřením klidového energetického výdeje pomocí nepřímé kalorimetrie.

V této části práce jsem se zabýval srovnáním jednotlivých prediktivních rovnic pro určení RMR s hodnotou RMR naměřenou pomocí nepřímé kalorimetrie. Následně jsem zhodnotil kvalitu predikce jednotlivých rovnic. Srovnání prediktivních rovnic jsem provedl použitím více statistických metod.

V první části jsem udělal procentuální srovnání. Dále jsem k vyhodnocení využil korelační analýzu a regresní vztahy, dvouvýběrový párový Studentův t-test a Bland-Altmanův graf. Zmíněné statistické testy budou podrobně popsány níže.

Na základě lineárních regresních modelů a příslušných p-hodnot mohu očekávat, že nejlepšími prediktory RMR budou následující tělesné parametry FFM, výška, věk a váha. Naopak méně významnými prediktory při stanovení RMR by měly následující tělesné parametry FM a BMI, viz tabulka 2.3.

Tabulka 2.3 Vliv tělesných parametrů na výslednou hodnotu RMR predikovanou danou rovnicí

Parametr	Věk	Váha	Výška	FFM	FM	BMI
p-hodnota	0,0017	0,0089	<0,0001	<0,0001	0,5039	0,6278

2.5.1 Procentuální srovnání prediktivních rovnic s nepřímou kalorimetrií

Za přesnou predikci byly považovány rovnice, jejichž predikce se pohybovala v intervalu 90 % až 110 % ve srovnání s měřenou hodnotou. Predikce nižší jak 90 % byla považována za predikci podhodnocenou, naopak predikce vyšší jak 110 % byla považována za predikci nadhodnocenou. Tyto prahové hodnoty jsem stanovil na základě následující studie uvedené v odkazu. [56]

V této práci jsem uvažoval, že nejpřesnější hodnotou, takzvaným zlatým standardem je hodnota RMR měřená nepřímou kalorimetrií. Na základě této hodnoty jsem vyhodnocoval přesnost prediktivních rovnic. Kvalita prediktivních rovnic byla odvozena na základě zprůměrování procentuálního vyjádření dané prediktivní rovnice od hodnoty, která byla naměřená nepřímou kalorimetrií pro každou osobu.

Pro sledovanou skupinu osob se ukázala jako nejpřesnější prediktivní rovnice pro určení RMR Korthova rovnice s FFM (viz tabulka 2.4), jejíž odhad se v průměru pohyboval okolo $87,5 \pm 13,6$ %. Nejméně kvalitní rovnicí pro sledovanou skupinu osob byla rovnice Bernsteinova rovnice s FFM 2 (viz tabulka 2.4), jejíž odhad se v průměru pohyboval okolo $65,8 \pm 9,8$ %. U všech prediktivních rovnic byl průměrný odhad nižší jak 90 %. Na základě této skutečnosti lze říct, že všechny prediktivní rovnice uvedené v této práci podhodnocují RMR. U 14 prediktivních rovnic byl průměrný odhad mezi 80-90 %, což považuji za skupinu prediktivních rovnic s nejlepší predikcí pro můj datový soubor. U 17 prediktivních rovnic byl průměrný odhad v rozsahu 70-80 %, což lze považovat za

velké podhodnocení RMR a u 2 prediktivních rovnic byl průměrný odhad nižší jak 70 %, což lze považovat za velmi velké podhodnocení RMR.

Jelikož do jednotlivých prediktivních rovnic vstupují různé vstupní parametry, rozhodl jsem se srovnání rozdělit do dvou skupin. První skupina rovnic dle tabulky 2.4 je bez značky a druhá skupina rovnic je označena značkou (*). Rozdělení jsem provedl na základě náročnosti měření jednotlivých tělesných parametrů.

První skupinu rovnic tvoří rovnice, do kterých vstupují snadno měřitelné parametry jako je váha, výška, věk a pohlaví. V této skupině rovnic poskytuje nejlepší predikci RMR vzhledem k vychýlení (tj. průměrný rozdíl vyjádřený v %) a přesnosti (tj. variability rozdílu vyjádřeného v %) Korthova rovnice (85,8±13,2 %).

Druhou skupinu tvoří rovnice, do kterých vstupují parametry složení těla, které jsou „hůře“ měřitelné (potřebujeme specifický přístroj např. InBody 770) jako je FFM a FM. V této skupině rovnic poskytuje nejlepší predikci RMR vzhledem k vychýlení (tj. průměrný rozdíl vyjádřený v %) a přesnosti (tj. variability rozdílu vyjádřeného v %) Korthova rovnice s FFM (87,5±13,6 %).

Tabulka 2.4 Procentuální srovnání prediktivních rovnic s metodou nepřímé kalorimetrie

Přehled jednotlivých rovnic	[%] ±SD	Přehled jednotlivých rovnic	[%] ±SD
Nepřímá kalorimetrie	100,0±0	L a K rovnice	76,4±10,5
Faustův vzorec	85,9±19,3	Owenova rovnice	72,6±12,3
Korthova rovnice	85,8±13,2	Bernsteinova rovnice	66,2±9,2
Lazzerova rovnice	85,0±13,5	Průměrná hodnota	79,4±11,8
De Lorenzova rovnice	81,5±11,5	Korthova rovnice s FFM*	87,5±13,6
Schofieldova rovnice (výška)	81,5±12,6	Cunninghamova rovnice*	86,2±12,5
FAO (pouze váha)	81,2±12,6	Bernsteinova rovnice FFM 1*	86,1±12,1
Harris-Benedict rovnice (re.)	81,1±11,3	Johnstoneova rovnice*	81,1±11,8
FAO (výška a váha)	81,0±12,4	Lazzerova rovnice s FFM*	79,1±13,1
Harris-Benedict rovnice	80,9±11,2	Katch-McArdle rovnice*	78,9±11,9
Schofieldova rovnice (váha)	80,6±12,5	Garrowa rovnice*	78,6±10,9
Müllerova rovnice BMI <30	79,5±7,3	Müllerova rovnice s FFM*	78,2±11,4
Henryho rovnice (výška)	78,5±12,3	Huangova rovnice s FFM*	75,7±12,1
Müllerova rovnice BMI >30	78,4±7,6	Owenova rovnice s FFM*	75,6±12,3
Müllerova rovnice	78,1±11,5	Mifflinova rovnice s FFM*	75,5±11,1
Henryho rovnice (váha)	78,1±12,5	Bernsteinova rovnice FFM 2*	65,8±9,8
Huangova rovnice	77,6±12,8	Průměrná hodnota*	79,1±11,9
Mifflinova rovnice	77,4±10,8		

Pro obě skupiny rovnic byla vypočtena průměrná hodnota. Tyto hodnoty udávají přesnost predikce RMR rovnic, které spadají do dané skupiny. Pro první skupinu je průměrná hodnota 79,4±11,8 % a pro druhou skupinu 79,1±11,9 %. Můžeme vidět, že rozdíl mezi skupinami není, tudíž na základě tohoto výpočtu nemůžeme prokazatelně určit, zda jsou vstupní parametry lepší pro predikci RMR u první skupiny rovnic nebo u druhé.

2.5.2 Korelační analýza a regresní vztahy

Pro validaci hodnot RMR vypočtených pomocí prediktivních rovnic a naměřených hodnot pomocí nepřímé kalorimetrie jsem jako další statistickou metodu zvolil korelační analýzu, a to s využitím Pearsonova korelačního koeficientu. Dále pro určení vztahů mezi hodnotami RMR naměřenými pomocí nepřímé kalorimetrie a hodnotami RMR predikovanými dle jednotlivých rovnic jsem použil jednoproměnný lineární regresní model.

- **Korelační analýza**

Korelační analýza slouží ke zjištění vzájemných vztahů mezi dvěma veličinami. Umožňuje nám kvantifikovat míru této souvislosti a současně lze pomocí vhodných statistických testů ověřovat její významnost.

Jedním z často používaných je Pearsonův korelační koeficient. Ten vyjadřuje míru rozptylu bodů kolem přímky (určující lineární vztah mezi dvěma veličinami) a nabývá hodnot, které se nachází v intervalu od -1 do 1. [41]

Nabývá-li Pearsonův korelační koeficient hodnoty 0 znamená to, že mezi dvěma veličinami se nenachází žádný lineární vztah. Nabývá-li Pearsonův korelační koeficient kladné hodnoty, jedná se o přímou lineární souvislost mezi dvěma veličinami. Znamená to, že když hodnota jedné veličiny roste, tak hodnota druhé veličiny má tendenci narůstat s ní. Nabývá-li Pearsonův korelační koeficient záporné hodnoty, jedná se o nepřímou lineární souvislost mezi dvěma veličinami. To znamená, že když hodnota jedné veličiny narůstá, druhá má tendenci klesat. Čím více se blíží hodnota korelačního koeficientu k jedné nebo mínus jedné, tím je vztah mezi dvěma veličinami silnější. [41]

Pomocí statistických testů pro Pearsonův korelační koeficient lze ověřovat, jestli mezi danou dvojicí veličin existuje lineární vztah. V takovém případě testujeme nulovou hypotézu o tom, že tento korelační koeficient je nula, oproti alternativní hypotéze, že je různý od nuly.

- **Hodnocení korelační analýzy a regresních vztahů**

Na základě regresních vztahů, respektive na směrnici přímky, jsem sledoval, jak prediktivní rovnice určují RMR v porovnání s metodou nepřímé kalorimetrie (jestli jej určují nevychýleně nebo zda jej mají tendenci nadhodnocovat či podhodnocovat). Velikost směrnice v regresním vztahu vyjadřuje, o kolik v průměru naroste hodnota závislé proměnné (hodnota naměřená nepřímou kalorimetrií), když hodnotu nezávislé proměnné (hodnota vypočtená danou prediktivní rovnicí) zvýšíme o 1. To znamená, že směrnice nám určuje, do jaké míry daná prediktivní rovnice má tendenci podhodnocovat či nadhodnocovat hodnoty RMR změřené pomocí nepřímé kalorimetrie. Hodnoty směrnice přímky byly proto ohodnoceny s následujícími prahovými hodnotami: <0,6 velmi vysoké podhodnocení klidového energetického výdeje danou prediktivní rovnicí; <0,6-0,8 vysoké podhodnocení klidového energetického výdeje danou prediktivní

rovnici; <0,8-0,9 malé podhodnocení klidového energetického výdeje danou prediktivní rovnici; <0,9-1 velmi malá nebo téměř dokonalá predikce klidového energetického výdeje danou prediktivní rovnici. Analogické ohodnocení získáme pro tendenci nadhodnocovat, když směrnice přímky bude větší jak 1. [50]

Tabulka 2.5 Korelační koeficienty a regresní vztahy

Přehled jednotlivých rovnic	Korelační koeficient	Regresní rovnice
Korthova rovnice	0,812 ^{***}	$y = 222^* + 0,761^{***} X$
Lazzerova rovnice s FFM	0,782 ^{***}	$y = 184^* + 0,709^{***} X$
Korthova rovnice s FFM	0,784 ^{***}	$y = 399^* + 0,692^{***} X$
Harris-Benedict rovnice	0,818 ^{***}	$y = 265^* + 0,691^{***} X$
Owenova rovnice s FFM	0,783 ^{***}	$y = 178^* + 0,677^{***} X$
Schofieldova rovnice (výška)	0,782 ^{***}	$y = 302^* + 0,675^{***} X$
De Lorenzova rovnice	0,812 ^{***}	$y = 346^* + 0,656^{***} X$
FAO (pouze váha)	0,771 ^{***}	$y = 342^* + 0,652^* X$
Schofieldova rovnice (váha)	0,777 ^{***}	$y = 354^* + 0,643^{***} X$
Garrowa rovnice	0,812 ^{***}	$y = 313^* + 0,643^{***} X$
Harris-Benedict rovnice (re.)	0,809 ^{***}	$y = 380^* + 0,638^{***} X$
Mifflinova rovnice	0,821 ^{***}	$y = 311^* + 0,632^{***} X$
FAO (výška a váha)	0,776 ^{***}	$y = 391^* + 0,629^{***} X$
Lazzerova rovnice	0,761 ^{***}	$y = 486^* + 0,626^{***} X$
Henryho rovnice (váha)	0,761 ^{***}	$y = 336^* + 0,625^{***} X$
Johnstoneova rovnice	0,794 ^{***}	$y = 420^* + 0,617^{***} X$
Huangova rovnice	0,768 ^{***}	$y = 354^* + 0,614^{***} X$
Faustův vzorec	0,609 ^{**}	$y = 530^* + 0,613^{**} X$
L a K rovnice	0,816 ^{***}	$y = 343^* + 0,609^{***} X$
Henryho rovnice (výška)	0,772 ^{***}	$y = 381^* + 0,607^{***} X$
Bernsteinova rovnice	0,832 ^{***}	$y = 130^* + 0,605^{***} X$
Huangova rovnice s FFM	0,767 ^{***}	$y = 359^* + 0,594^{***} X$
Cunninghamova rovnice	0,784 ^{***}	$y = 589^{**} + 0,590^{***} X$
Müllerova rovnice	0,779 ^{***}	$y = 437^* + 0,581^{***} X$
Katch-McArdle rovnice	0,784 ^{***}	$y = 458^* + 0,579^{***} X$
Müllerova rovnice s FFM	0,769 ^{***}	$y = 501^{**} + 0,543^{***} X$
Bernsteinova rovnice FFM 1	0,793 ^{***}	$y = 695^{**} + 0,538^{***} X$
Bernsteinova rovnice FFM 2	0,797 ^{***}	$y = 279^* + 0,532^{***} X$
Mifflinova rovnice s FFM	0,784 ^{***}	$y = 492^{**} + 0,528^{***} X$
Owenova rovnice	0,718 ^{***}	$y = 477^* + 0,506^{***} X$
Müllerova rovnice BMI <30	0,605 [*]	$y = 657^* + 0,512^* X$
Müllerova rovnice BMI >30	0,595 [*]	$y = 656^* + 0,507^* X$

* $p \geq 0,05$; ** $0,001 \leq p < 0,05$; *** $p < 0,001$, y-hodnota RMR získaná pomocí nepřímé kalorimetrie, X-hodnota RMR vypočítaná pomocí dané prediktivní rovnice

Tabulka 2.5 obsahuje výsledky lineární regrese pro vztah mezi nepřímou kalorimetrií (jako závislou proměnnou) a danou prediktivní rovnicí (jako nezávislou proměnnou). U každé prediktivní rovnice byla testována hypotéza o nulovosti absolutního členu β_0 a nulová hypotéza o tom, že směrnice přímky je rovna jedné.

Korelační koeficient vychází statisticky nevýznamný u dvou prediktivních rovnic, a to rovnic odvozených dle Müllera (uvedené v tabulce 2.5 červeně). U ostatních prediktivních rovnic jsou párové korelační koeficienty statisticky významné.

Na základě regresních vztahů uvedených v tabulce 2.5 můžu soudit, že 21 prediktivních rovnic poskytuje vysoké podhodnocení RMR, přičemž nejlepší predikci z této skupiny poskytla Korthova rovnice. Zbývajících 9 prediktivních rovnic poskytuje velmi vysoké podhodnocení RMR, přičemž nejhorší predikci z této skupiny poskytla Owenova rovnice.

2.5.3 Dvouvýběrový párový Studentův test

Tento test porovnává střední hodnoty sledované veličiny mezi dvěma závislými skupinami. To nastává v situacích, kdy provádíme měření jedné veličiny na každém subjektu dvakrát. K tomu může dojít v experimentech při opakovaném měření v čase (například pro zjištění, zda daná tréninková metoda má nějaký účinek, můžeme postupovat tak, že zjistíme výkonnost skupiny sportovců před zavedením nové tréninkové metody a po jejím absolvování) nebo třeba při porovnání dvou metod, z nichž jedna tvoří zlatý standard (například ve studii při vyhodnocování nové metody pro určení množství tělesného tuku bude každý jedinec podstupovat dvoje měření, a to jednak novou metodou a metodou tvořící zlatý standard).

Pomocí párového Studentova testu můžeme zjišťovat, zda mezi dvěma skupinami je předem daný rozdíl, jehož hodnotu zadáváme do tvrzení nulové hypotézy. V případě, že tento rozdíl bude nulový, znamená to, že se střední hodnoty mezi oběma skupinami neliší.

Podmínkou pro korektní použití tohoto testu je, aby se rozdíl hodnot mezi oběma skupinami řídil normálním rozložením.[42]

Testovací kritérium vypočteme dle následujícího vzorce:

$$T = \frac{\bar{X} - \bar{Y} - (\mu_X - \mu_Y)}{\frac{S}{\sqrt{n}}}$$

kde \bar{X} a \bar{Y} představují průměry obou výběrových souborů, S je příslušná směrodatná odchylka rozdílu X a Y a n je počet subjektů výběrového souboru. [42]

Při testování nulové hypotézy porovnáváme vypočtenou hodnotu testovacího kritéria T s kritickou hodnotou danou kvantilem Studentova rozložení. V případě oboustranné

alternativní hypotézy je kritická hodnota určena $1-\alpha/2$ kvantilem Studentova rozložení s $n-1$ stupni volnosti, tj. jako $t_{1-\alpha/2}(n-1)$. [42]

Bude-li velikost vypočtené hodnoty testovacího kritéria menší než kritický kvantil $t_{1-\alpha/2}(n-1)$, nezamítáme nulovou hypotézu na hladině významnosti α . Pokud velikost vypočtené hodnoty testovacího kritéria bude naopak větší než $t_{1-\alpha/2}(n-1)$, tak nulovou hypotézu na hladině významnosti α zamítáme. [42]

Jako další statistický přístup pro porovnání predikované hodnoty RMR pomocí rovnic s měřenou hodnotou RMR pomocí nepřímé kalorimetrie jsem použil dvouvýběrový párový Studentův test. Čím menší bude hodnota T pro danou rovnici, tím lepší predikci RMR rovnice poskytuje. Výsledky tohoto srovnání jsou uvedeny v tabulce 2.6.

Tabulka 2.6 Výsledky srovnání predikovaných hodnot RMR (rovnice) a měřených hodnot RMR (nepřímá kalorimetrie) s použitím dvouvýběrového párového Studentova testu (T představuje hodnotu testovacího kritéria)

Přehled jednotlivých rovnic	T	p-hodnota	Přehled jednotlivých rovnic	T	p-hodnota
Faustův vzorec	6,703	<0,0001	Katch-McArdle rovnice	14,126	<0,0001
Korthova rovnice s FFM	8,228	<0,0001	Henryho rovnice (váha)	14,182	<0,0001
Cunninghamova rovnice	9,314	<0,0001	Henryho rovnice (výška)	14,323	<0,0001
Bernsteinova rovnice FFM 1	9,537	<0,0001	Müllerova rovnice	14,508	<0,0001
Korthova rovnice	9,611	<0,0001	Huangova rovnice	14,577	<0,0001
Lazzerova rovnice	9,612	<0,0001	Müllerova rovnice s FFM	14,757	<0,0001
Schofieldova rovnice (výška)	12,351	<0,0001	Garrowa rovnice	15,260	<0,0001
FAO (pouze váha)	12,436	<0,0001	Huangova rovnice s FFM	15,698	<0,0001
FAO (výška a váha)	12,617	<0,0001	Owenova rovnice s FFM	16,110	<0,0001
Schofieldova rovnice (váha)	12,827	<0,0001	Mifflinova rovnice s FFM	16,260	<0,0001
Johnstoneova rovnice	13,057	<0,0001	Mifflinova rovnice	16,412	<0,0001
De Lorenzova rovnice	13,202	<0,0001	Owenova rovnice	16,506	<0,0001
Harris-Benedict rovnice (re.)	13,339	<0,0001	L a K rovnice	16,805	<0,0001
Harris-Benedict rovnice	13,601	<0,0001	Bernsteinova rovnice FFM 2	23,064	<0,0001
Lazzerova rovnice s FFM	13,614	<0,0001	Bernsteinova rovnice	24,886	<0,0001

Z hodnot v tabulce 2.6 můžeme vidět, že všechny rovnice pro určení RMR predikovaly hodnoty RMR celkově statisticky významně odlišně ve srovnání s hodnotami RMR měřenými pomocí metody nepřímé kalorimetrie. Přesto nejmenší rozdíl mezi predikovanými a měřenými hodnotami poskytl Faustův vzorec ($T=6,703$; $p < 0,0001$) a naopak největší rozdíl mezi predikovanými a měřenými hodnotami RMR poskytuje Bernsteinova rovnice ($T=24,886$; $p < 0,0001$).

2.5.4 Bland-Altmanův graf

Jako další statistický přístup pro validaci predikovaných hodnot RMR s naměřenými hodnotami RMR jsem použil metodu, která se nazývá Bland-Altmanův graf.

Bland-Altmanův graf neboli rozdílový graf slouží k hodnocení nepodobnosti mezi dvěma metodami měření. Lze využít v případech, kdy porovnáváme například dvě klinické měření. Bland-Altmanův graf spočívá v tom, že na osu y vynášíme rozdíl hodnot $x-y$, kde hodnota x představuje hodnotu získanou z jedné metody měření (nepřímá kalorimetrie) a hodnota y představuje hodnotu získanou druhou metodou měření (prediktivní rovnice). Na osu x vynášíme průměr hodnot x a y , tedy $(x+y) / 2$. Vynesením průměrné hodnoty na osu x zamezíme takzvané umělé korelaci mezi hodnotami $x-y$ a x . Bland-Altmanův graf se doplňuje o tři kontrolní čáry, kde první kontrolní čára vyjadřuje průměr rozdílů a zbývající dvě kontrolní čáry jsou standardně zakresleny do vzdálenosti $\pm 1,96 * SD$ od průměrného rozdílu, představující tak 95 % interval spolehlivosti pro rozdíl hodnot mezi dvěma metodami měření. Průměrný rozdíl je odhadovaná odchylka a SD rozdílů měří náhodné výkyvy kolem tohoto průměru. Pokud se střední hodnota rozdílu významně liší od 0 na základě t-testu s 1 vzorkem, znamená to přítomnost fixního zkreslení. Pokud existuje konzistentní zkreslení, lze jej upravit odečtením průměrného rozdílu od nové metody. [41]

Při vyhodnocení srovnání použitých prediktivních rovnic s metodou nepřímé kalorimetrie jsem použil Bland-Altmanův graf. V něm jsem provedl jednu modifikaci. Jelikož počet měření je v mém případě relativně malý, pozměnil jsem hodnoty dvou kontrolních čar tvořících interval spolehlivosti pro rozdíl, a to tak, že původní rozmezí $\pm 1,96 * SD$ od průměrného rozdílu (které odpovídá asymptotického rozložení, kdy počet měření bude velmi velký) jsem nahradil oblastí v rozsahu $\pm 2,08 * SD$ od průměrného rozdílu. Je to z toho důvodu, že hodnota 2,08 představuje 0,975 kvantil Studentova rozložení s 21 stupni volnosti (mám 22 měření a počet stupňů volnosti u Studentova rozložení je o 1 menší). Oblast $\pm 2,08 * SD$ od průměrného rozdílu tak představuje 95% interval spolehlivosti pro rozdíl hodnot.

- **Hodnocení Bland-Altmanova grafu**

Průměrný rozdíl definuje o kolik kilokalorií za jeden den se v průměru liší predikovaná hodnota RMR danou rovnicí vůči nepřímé kalorimetrii. Dolní a horní mez vyjadřují 95 % interval spolehlivosti pro rozdíl mezi predikovanou a naměřenou hodnotou RMR.

Výsledky jsou uvedeny v tabulce 2.7. Kvalitu srovnání predikce RMR dané prediktivními rovnicemi s hodnotami RMR naměřenými pomocí nepřímé kalorimetrie jsem provedl ze dvou pohledů – z hlediska vychýlení (průměrného rozdílu) a přesnosti (variability rozdílu).

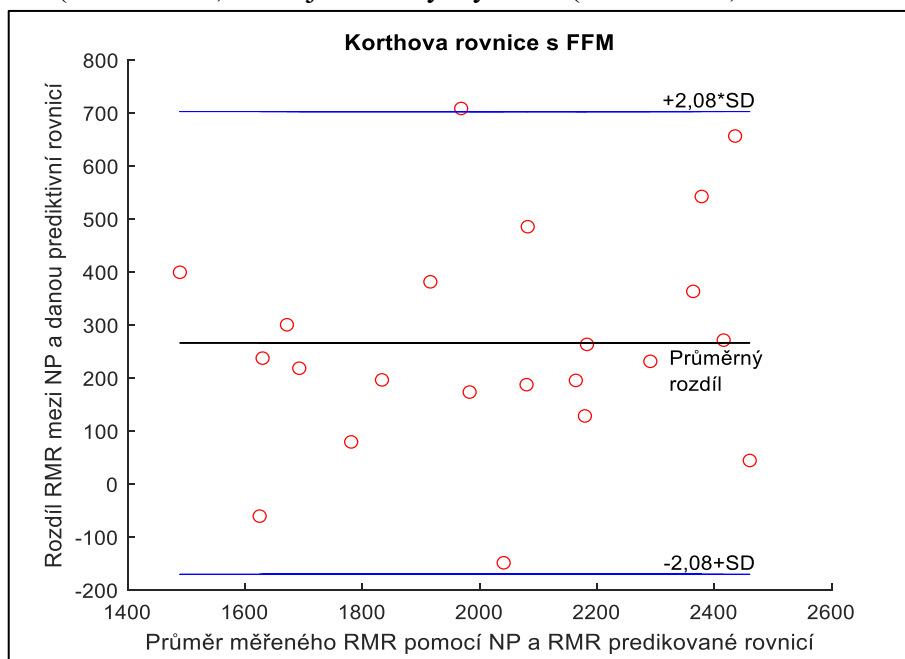
Tabulka 2.7 Rozdíly mezi predikovanými RMR a měřenými RMR

	Průměrný rozdíl ±SD	Dolní mez 95 % IS	Horní mez 95 % IS
Přehled jednotlivých rovnic	[kcal/den]	[kcal/den]	[kcal/den]
Korthova rovnice s FFM	266,7±209,8	-169,8	703,2
Korthova rovnice	295,2±198,8	-118,4	708,8
Cunninghamova rovnice	298,5±207,5	-133,0	730,0
Bernsteinova rovnice FFM 1	304,4±206,6	-125,3	734,1
Faustův vzorec	306,3±295,8	-308,9	921,5
Lazzerova rovnice	322,9±217,5	-129,4	775,2
Müllerova rovnice BMI <30	330,2±323,4	-342,4	1002,8
Müllerova rovnice BMI >30	343,4±324,0	-330,6	1017,4
De Lorenzova rovnice	397,1±194,7	-7,9	802,2
Schofieldova rovnice (výška)	400,4±209,8	-36,1	836,8
Harris-Benedict rovnice	403,1±191,9	4,0	802,1
Harris-Benedict rovnice (re.)	403,9±196,0	-3,8	811,6
Johnstoneova rovnice	408,8±202,7	-12,8	830,4
FAO (pouze váha)	410,7±213,8	-34,0	855,4
FAO (výška a váha)	410,8±210,8	-27,6	849,2
Schofieldova rovnice (váha)	417,7±210,8	-20,8	856,2
Lazzerova rovnice s FFM	446,1±212,1	4,9	887,4
Katch-McArdle rovnice	453,3±207,7	20,3	885,4
Garrowa rovnice	459,3±194,8	21,2	885,3
Henryho rovnice (výška)	469,0±212,0	54,0	864,5
Müllerova rovnice	469,4±209,5	28,1	909,9
Henryho rovnice (váha)	476,2±217,4	33,8	905,1
Huangova rovnice	481,5±213,8	24,1	928,3
Mifflinova rovnice	484,6±191,1	36,8	926,3
Müllerova rovnice s FFM	488,1±214,1	87,0	882,1
L a K rovnice	504,3±194,2	42,7	933,5
Huangova rovnice s FFM	519,1±214,1	100,2	908,3
Owenova rovnice s FFM	521,0±209,3	73,9	964,3
Mifflinova rovnice s FFM	528,3±210,3	85,5	956,4
Owenova rovnice	592,3±232,3	90,8	965,7
Bernsteinova rovnice	724,0±188,3	109,1	1075,4
Bernsteinova rovnice FFM 2	734,5±206,1	332,3	1115,7

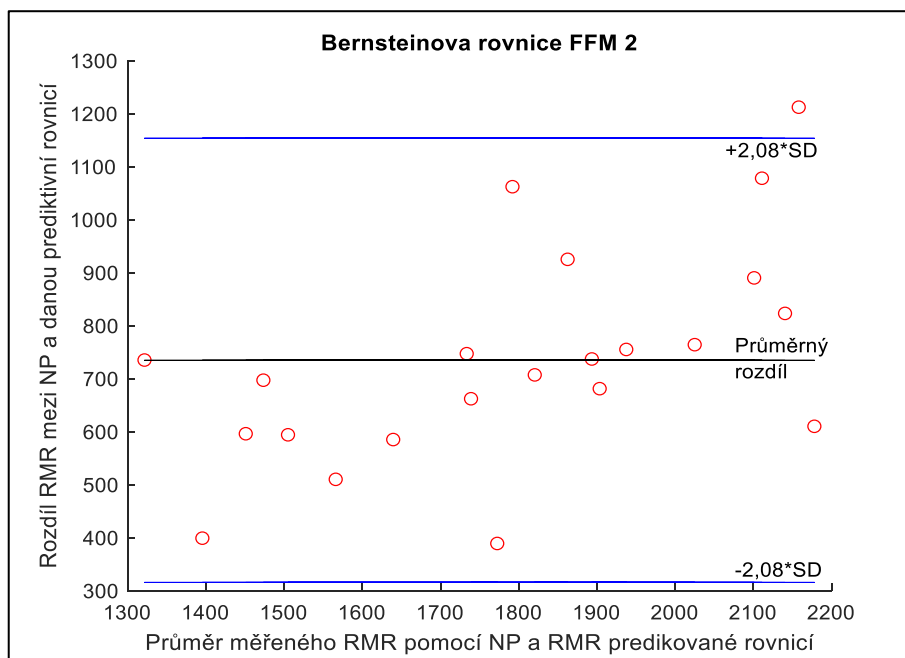
Z hodnot uvedených v tabulce 2.7 můžeme vidět, že predikci s nejmenším vychýlením poskytovala Korthova rovnice s FFM (266,7±209,8) a naopak predikci

s největším vychýlením poskytovala Bernsteinova rovnice FFM 2 ($734,5 \pm 206,1$). Ovšem z hlediska vychýlení a přesnosti poskytla nejlepší predikci RMR Korthova rovnice ($295,2 \pm 198,8$). U žádné prediktivní rovnice se neprokázalo konzistentní zkreslení.

Pro ilustraci též uvádím grafické znázornění rozdílu RMR mezi měřenou hodnotou a predikovanou hodnotou s pomocí Bland-Altmanova grafu pro predikci s nejmenším vychýlením (obrázek 2.2) a s největším vychýlením (obrázek 2.3).

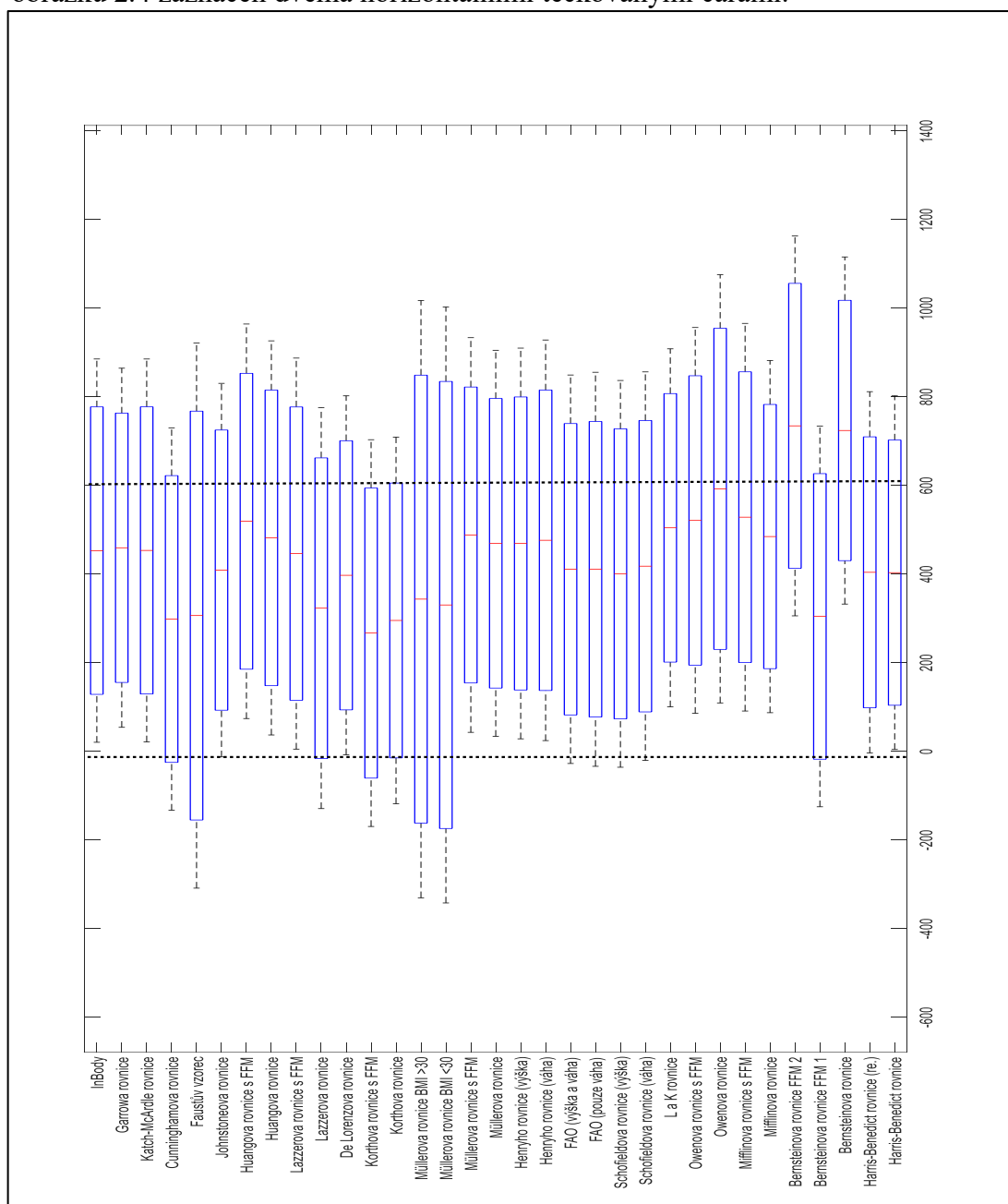


Obrázek 2.2 Bland-Altmanův graf pro nepřímou kalorimetrii a Korthovu rovnici (s nejmenším vychýlením)



Obrázek 2.3 Bland-Altmanův graf pro nepřímou kalorimetrii a Bernsteinovu rovnici s FFM 2 (s největším vychýlením)

Dále na obrázku 2.4 se nachází graf zobrazující průměrné rozdíly a jejich příslušné 95 % intervaly spolehlivosti pro rozdíly mezi RMR určeným danou prediktivní rovnicí a nepřímou kalorimetrií, kde horizontální čára (uprostřed krabice) reprezentuje průměrný rozdíl predikované hodnoty RMR vůči měřené hodnotě RMR, a vertikální rozsah reprezentuje 95 % interval spolehlivosti pro danou prediktivní rovnici. Jelikož je rozdíl mezi predikovanou hodnotou a měřenou hodnotou RMR počítán jako měřená hodnota minus predikovaná hodnota, tak podhodnocení se projevuje kladnými hodnotami. Nejlepší predikci poskytuje Korthova rovnice jejíž 95 % interval spolehlivosti je v obrázku 2.4 zaznačen dvěma horizontálními tečkovanými čarami.



Obrázek 2.4 Graf zobrazující 95 % intervaly spolehlivosti pro rozdíl mezi hodnotami RMR získanými nepřímou kalorimetrií a jednotlivými prediktivními rovnicemi

2.6 Odvození vlastního postupu pro predikci klidového energetického výdeje

Pro odvození vlastní predikce RMR jsem využil dvě metody. První metodou je lineární regrese, pro niž výpočty byly provedeny prostřednictvím programu GRETL 2021b. Druhou metodou je neuronová síť, která byla vytvořena prostřednictvím programu MATLAB R2018b.

2.6.1 Odvození vlastní rovnice pro predikci klidového energetického výdeje

Rovnice pro predikci RMR nebyla odvozena na celém datovém souboru, protože datový soubor je poměrně malý co do rozsahu a nehomogenní co do rozložení sledovaných charakteristik. Tudíž jsem se rozhodl tuto analýzu zúžit na homogennější podskupinu v mém souboru, kterou představuje 9 aktivně sportujících mužů ve věku od 20 do 26 let, přičemž 7 mužů bylo použito pro odvození rovnice a 2 byli použiti pro testování odvozené rovnice. Odvození rovnice vychází z lineární regrese, která je teoreticky popsána v kapitole 2.4.

- **Budování modelu pomocí krokové (Stepwise) metody**

Jedná se o metodu pro nalezení „nejlepšího“ modelu. Kroková metoda má dvě varianty, kterými jsou metoda dopředná neboli metoda vzestupného výběru (forward) a metoda zpětná neboli metoda sestupného výběru (backward). [51]

Metoda dopředná představuje iterativní proces výběru nezávislých proměnných, které významně přispívají k vysvětlení variability závislé proměnné. Tato metoda funguje tak, že začínáme s nulovým modelem a postupně přidáváme do tohoto modelu po jedné proměnné z našeho souboru kandidátních proměnných. Vybereme tu proměnnou, která má největší efekt či hodnotu určitého výběrového kritéria nejlepší. Tím získáme výchozí model pro další iterativní krok. V dalším kroku postupujeme analogicky, akorát nyní soubor kandidátních proměnných tvoří soubor bez nezávislé proměnné ve výchozím modelu. Postupujeme tak dlouho, dokud již žádná ze zbývajících proměnných výchozí model nezlepšuje nebo do okamžiku, kdy v souboru proměnných žádná nezůstane. [51]

Metoda zpětná funguje obdobně, akorát s tím rozdílem, že výchozí model je model, který zahrnuje všechny kandidátní proměnné a v jednotlivých iterativních krocích vylučujeme ty veličiny, které nemají významný efekt (či nesplňují hodnotu nějakého kritéria). [51]

- **Lineární regresní model pro predikci klidového energetického výdeje**

Iterativní krok 1: Pro vytvoření/vybudování lineárního regresního modelu pro predikci RMR byly jako nezávislé proměnné použity parametry lidského těla, jako je věk, váha, výška, FFM, FM a BMI. K tomuto účelu jsem se rozhodl použít krokovou dopřednou metodu.

Tabulka 2.8 Výsledky prvního iterativního kroku při budování modelu pro predikci RMR

Výchozí model	Kandidátní model	Odhad β_1	p-hodnota (pro odhad β_1)
RMR= β_0	RMR= $\beta_0+\beta_1$ *věk	-24,01	0,4947
	RMR= $\beta_0+\beta_1$ *váha	11,44	0,0270
	RMR= $\beta_0+\beta_1$ *výška	10,27	0,4089
	RMR=$\beta_0+\beta_1$*FFM	21,78	0,0243
	RMR= $\beta_0+\beta_1$ *FM	19,91	0,0632
	RMR= $\beta_0+\beta_1$ *BMI	46,29	0,0286

Z výše uvedených hodnot (p-hodnota) v tabulce 2.8 můžeme vidět, že regresní koeficient byl statisticky významně odlišný od nuly u tří kandidátních modelů, a to pro nezávislé proměnné váha, FFM a BMI. Naopak regresní koeficient byl statisticky nevýznamně odlišný od nuly též u tří kandidátních modelů, a to pro nezávislé proměnné věk, výška a FM. Nejvýznamnějším modelem (nulový model) byl model 4, který vyjadřuje závislost FFM na RMR. Tento model je pro mě výchozím v dalším iterativním kroku.

Iterativní krok 2: K tomuto modelu budu postupně přidávat další nezávislé proměnné a sledovat, zda daná nezávislá proměnná je statisticky významná, jestliže bude statisticky významná bude vložena k modelu 4, pokud nebude statisticky významná bude vyloučena.

Tabulka 2.9 Výsledky druhého iterativního kroku při budování modelu pro predikci RMR

Výchozí model	Kandidátní model	Odhad β_1	p-hodnota (pro odhad β_1)
RMR= $\beta_0+\beta_1$ *FFM	RMR=$\beta_0+\beta_1$*FFM+β_2*věk	-37,15	0,0419
	RMR= $\beta_0+\beta_1$ *FFM+ β_2 *váha	4,56	0,7557
	RMR= $\beta_0+\beta_1$ *FFM+ β_2 *výška	-8,47	0,4312
	RMR= $\beta_0+\beta_1$ *FFM+ β_2 *FM	4,56	0,7557
	RMR= $\beta_0+\beta_1$ *FFM+ β_2 *BMI	25,42	0,2908

Na základě p-hodnot regresního koeficientu uvedených v tabulce 2.9 vidíme, že jako jediná statisticky významná nezávislá proměnná po jejím vložení do modelu s FFM, byla věk. V dalším kroku tedy bude mým výchozím modelem model s FFM a věkem.

Tabulka 2.10 Výsledky třetího iterativního kroku při budování modelu pro predikci RMR

Výchozí model	Kandidátní model	Odhad β_1	p-hodnota (pro odhad β_1)
$RMR = \beta_0 + \beta_1 * FFM + \beta_2 * věk$	$RMR = \beta_0 + \beta_1 * FFM + \beta_2 * věk + \beta_3 * váha$	-10,59	0,3083
	$RMR = \beta_0 + \beta_1 * FFM + \beta_2 * věk + \beta_3 * výška$	-4,59	0,5321
	$RMR = \beta_0 + \beta_1 * FFM + \beta_2 * věk + \beta_3 * FM$	-8,47	0,4312
	$RMR = \beta_0 + \beta_1 * FFM + \beta_2 * věk + \beta_3 * BMI$	4,56	0,7557

Iterativní krok 3: V tabulce 2.10 žádná ze čtyř proměnných není statisticky významná. To znamená, že významně nepřispívají k výchozímu modelu s FFM a věkem. Tento model tedy považují za konečný (z 2. iterativního kroku). V praxi to znamená, že nám postačí u dané osoby zjistit věk a změřit její hodnotu FFM. Ostatní nezávislé proměnné jsou pro odvozenou rovnici nepotřebné k výpočtu RMR.

- Zápis konečného modelu pro predikci RMR.**

$$RMR = -1456,7 + 24,2 \times FFM - 37,2 \times věk$$

Parametry modelu jsou následující. Střední hodnota závislé proměnné je 2374. Směrodatná chyba regrese představuje míru rozptýlení pozorovaných hodnot okolo regresní přímky a její hodnota pro tento model je 69,6. Koeficient determinace je pro tento model 0,90. Můžu tedy říct, že tomuto modelu se podařilo vysvětlit 90 % variability závislé proměnné. Tento model jako celek je statisticky významný ($F(2,4)=17,29$; $p = 0,0107$).

- Srovnání predikované hodnoty RMR odvozenou rovnicí s měřenou hodnotou RMR**

Testování odvozené rovnice, bylo provedeno pouze na dvou osobách v důsledku malého počtu dat. Pro testování odvozené rovnice jsem použil pouze procentuální porovnání mezi predikovanou hodnotou RMR odvozenou rovnicí a měřenou hodnotou RMR.

Tabulka 2.11 Srovnání predikovaných hodnot rovnicí s měřenými hodnotami RMR

	Měřená hodnota RMR	Predikovaná hodnota RMR	Procentuální srovnání
	[kcal/den]	[kcal/den]	[%]
Osoba 1	2174	2174	100
Osoba 2	2262	2360	104

2.6.2 Neuronová síť pro predikci klidového energetického výdeje

Pro predikci RMR pomocí neuronové sítě jsem použil celý datový soubor osob, u kterých byl měřen klidový energetický výdej.

- **Vícevrstvá dopředná neuronová síť**

Základním stavebním kamenem neuronových sítí jsou umělé neurony (perceptony), které jsou vzájemně propojené tak, že výstup neuronu je vstupem obecně více neuronů. Architekturu neuronové sítě určuje počet neuronů a jejich vzájemné propojení. Podle funkce neuronu můžeme neurony rozlišovat na vstupní, skryté a výstupní.

Pro predikci klidového energetického výdeje jsem zvolil vícevrstvou dopřednou neuronovou síť s učitelem (fitnet), což znamená, že do neuronové sítě jsou posílány vstupní i výstupní data.

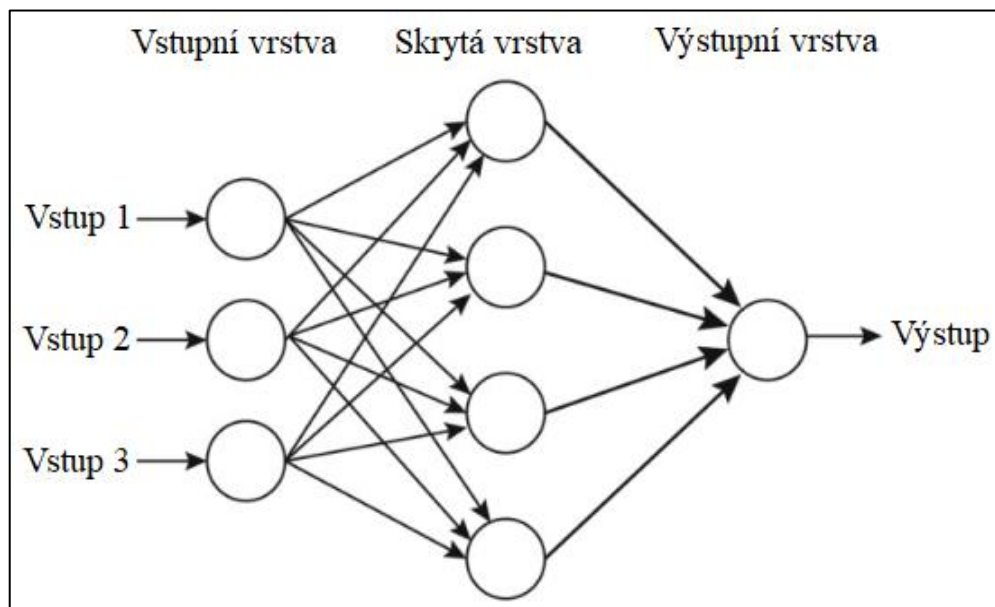
Vícevrstvá neuronová síť je tvořena jednou nebo více skrytými vrstvami neuronů, které jsou umístěny mezi vstupní a výstupní vrstvou. Tato neuronová síť je charakteristická tím, že každý neuron v příslušné vrstvě je spojen s každým neuronem v přecházející vrstvě. [52]

Výstup k -tého neuronu, který se nachází v n -té skryté nebo výstupní vrstvě lze vypočítat dle následujícího vzorce

$$y_k^n = f \left(w_{0,k}^n + \sum_{i=1}^m y_i^{n-1} * w_{i,k}^n \right), \text{ kde } f(x) \text{ je aktivační funkce, } w_{0,k}^n \text{ je bias neuronu a } m$$

je počet vah neuronu, kterému odpovídá taktéž počet výstupů neuronů v nižší vrstvě sítě. [52]

K určení topologie vícevrstvé neuronové sítě neexistuje žádný pevný vztah, proto topologii neuronové sítě určujeme experimentálně. Jedná se především o určení počtu vrstev neuronové sítě a počtu neuronů v těchto vrstvách. [53]



Obrázek 2.5 Znáornění topologie vícevrstvé neuronové sítě, převzato [54]

- **Příprava dat**

Celý datový soubor byl tvořen 22 osobami a to 14-ti muži a 8-mi ženami. Vzhledem k velikosti datového souboru jsem se rozhodl neprovádět selekci dat. Právě velikost datového souboru byla největším nedostatkem pro vytvoření neuronové sítě. Pro učení neuronové sítě jsem použil 10 mužů a 6 žen. Pro testování neuronové sítě jsem použil 4 muže a 2 ženy. Pro předzpracování dat jsem zkoušel využít normalizaci, což ovšem vedlo ke značnému zhoršení výsledků na testovací skupině, tudíž jsem data pro učení a testování sítě ponechal v surové podobě.

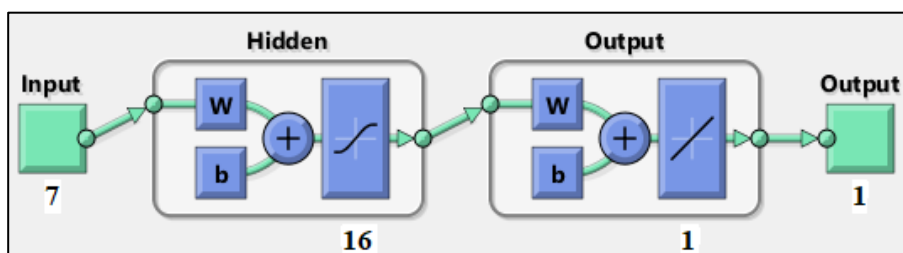
Tabulka 2.12 Analýza tělesného složení u trénovací a testovací skupiny osob

	Osoby pro trénování sítě	Osoby pro testování sítě
	Průměr \pm SD	Průměr \pm SD
Věk	31,6 \pm 20	31,2 \pm 6
Váha	82,1 \pm 20,9	68,7 \pm 5,1
Výška	177,3 \pm 13,3	175,9 \pm 7,5
FFM	63,9 \pm 17,1	57,1 \pm 7,2
FM	18,2 \pm 14,4	11,7 \pm 4,1
BMI	26,2 \pm 6,2	22,3 \pm 0,8
Pohlaví	Muži (n=10), ženy (n=6)	Muži (n=4), ženy (n=2)
RMR	2202,8 \pm 307,4	2059,2 \pm 224

V tabulce 2.12 je znázorněna analýza tělesného složení u trénovací a testovací skupiny osob, vyjádřena jako průměr \pm SD. Na základě hodnot v této tabulce je vidět, že trénovací skupina osob je dost rozmanitá a reprezentativní pro následné testování (osoby z testovacího souboru). Osoby pro testování neuronové sítě jsem vybral tak, aby každá osoba určená k testování neuronové sítě reprezentovala určitou věkovou skupinu.

- **Topologie neuronové sítě**

Počet vstupů neuronové sítě je 7, protože mám ke každé osobě 7 tělesných parametrů (věk, váha, výška, FFM, FM, BMI a pohlaví). Zvolil jsem jednu skrytou vrstvu, která má 16 neuronů (viz obrázek 2.6), k tomuto počtu skrytých vrstev a neuronů jsem došel na základě empirických zkoušek. Počet výstupů neuronové sítě je pouze jeden, protože chci pouze jednu výstupní hodnotu v podobě RMR. Propojení neuronů je každý s každým.



Obrázek 2.6 Topologie neuronové sítě

- **Učení neuronové sítě**

Nejpoužívanější učící algoritmus v oblasti neuronových sítí je backpropagation (algoritmus zpětného šíření chyby). Jeho využití je přibližně 80 % ve všech aplikacích. Algoritmus backpropagation můžeme rozdělit do tří částí, kterými jsou dopředné šíření vstupního signálu, zpětné šíření chyby a dopředný směr, při kterém dochází k aktualizaci vah neuronů. Během dopředného šíření vstupního signálu každý neuron ve vstupní vrstvě obdrží vstupní signál, který zprostředkují ke všem neuronům ve skryté vrstvě. Každý neuron ve skryté vrstvě vypočítá svůj výstup a pošle ho na vstup neuronů ve výstupní vrstvě. Výstupy neuronů ve výstupní vrstvě jsou porovnány s očekávanou hodnotou výstupu a je vypočtena chyba sítě, která je protlačována zpět skrz skrytou vrstvu na výstupní vrstvu, přičemž dojde k aktualizaci vah neuronů. Tento postup se opakuje do doby, než chyba sítě bude malá, ideálně nulová, ovšem nulová chyba sítě se v praxi nevyskytuje, tudíž za dostatečně malou chybu sítě považujeme hodnoty blízké se nule. [55]

V mé neuronové síti jsem zvolil učící algoritmus Levenberg-Marquardt. U algoritmu backpropagation je těsně před změnou váhy použit parametr η ovlivňující velikost změny vah. Tento parametr je pro celou síť a všechny váhy stejný. Principem algoritmu Levenberga-Marquardta je vylepšení backpropagation o individuální parametr učení, který je pro každou váhu jiný. Tento individuální parametr je zjišťován z druhé derivace chybové funkce. [55]

Pro učení neuronové sítě jsem použil 16 osob, z nichž bylo 10 mužů a 6 žen. Na obrázku 2.7 můžeme vidět, že neuronová síť se dokonale naučila na trénovací data, což je způsobené tím, že neuronová síť pracovala pouze s daty, které byly naměřeny na jedné populaci (skupině osob). Platí zde stejný problém jako je u odvozování prediktivních rovnic pro výpočet RMR. Jestliže je prediktivní rovnice odvozena na jedné populaci lidí, tak na jinou populaci lidí bude reagovat s určitým nedostatkem. Abych mohl vytvořit komplexní neuronovou síť, která by co nejpřesněji predikovala RMR u všech osob bez ohledu na jakýkoliv vnější vliv (například prostředí, ve kterém daná osoba žije, životní styl, obezita či podvyživenost), tak bych musel mít datový soubor, který by reprezentoval osoby napříč všemi populacemi.

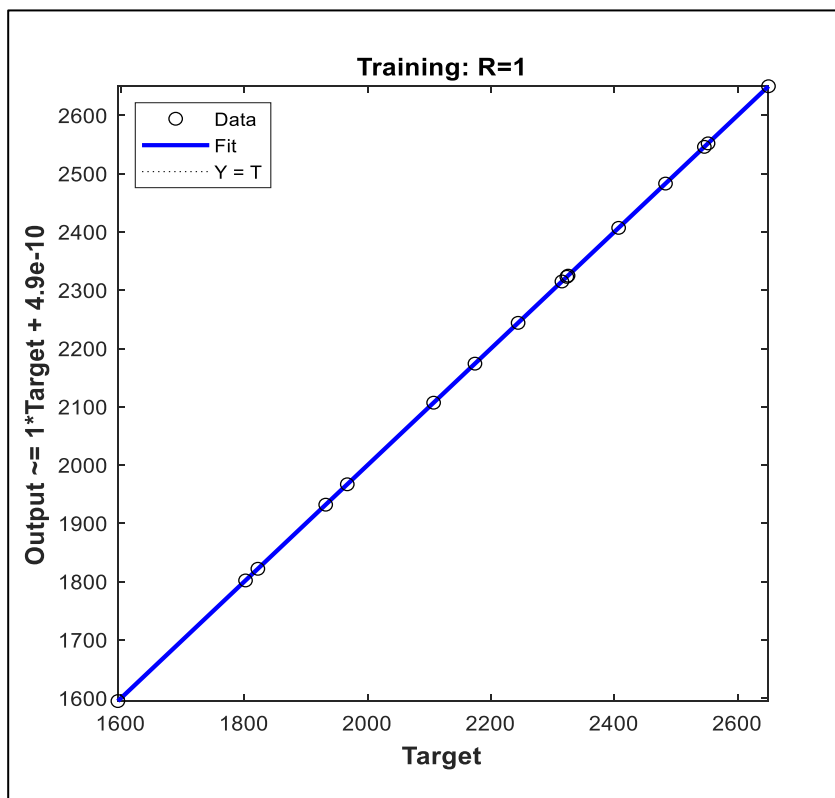
Při učení neuronové sítě byly neuronovou sítí stanoveny váhy neuronů. Váhy neuronů pro jednotlivé příznaky (tělesné parametry) byly následující (viz tabulka 2.12).

Tabulka 2.13 Váhy neuronů pro jednotlivé tělesné parametry (průměr \pm SD)

	Věk	Váha	Výška	FFM	FM	BMI	Pohlaví
průměr	0,59	0,86	0,77	0,68	0,85	0,70	0,63
medián	0,48	0,82	0,78	0,80	0,81	0,61	0,63

Z hodnot v tabulce 2.13 mohu říct, že moje neuronová síť pro predikci RMR považuje všechny tělesné parametry za silné prediktory RMR, přičemž nejsilnějšími prediktory

RMR jsou váha, výška, FFM a FM. Pokud by se váha pro některý tělesný parametr blížila nule, znamenalo by to, že bych mohl daný tělesný parametr vyloučit, což nenastalo.



Obrázek 2.7 Regresní graf zobrazující skutečné hodnoty RMR ve vztahu s predikovanými hodnotami RMR neuronovou sítí na trénovacích datech

- **Vyhodnocení testovacích dat**

Pro testování neuronové sítě jsem použil 6 osob, z nichž byly 4 muži a 2 ženy. V důsledku velkého věkové rozmezí osob v mém datovém souboru byly pro testování vybrané osoby tak, aby pokryly celkové věkové rozmezí celého souboru.

Tabulka 2.14 Srovnání měřené hodnoty RMR s hodnotami predikovanými neuronovou sítí

	Měřená hodnota RMR	Predikovaná hodnota RMR neuronovou sítí	Procentuální srovnání
	[kcal/den]	[kcal/den]	[%]
Osoba 1	2262	2409	106,5
Osoba 2	2070	2019	97,5
Osoba 3	2764	2629	95,1
Osoba 4	1821	1694	93,0
Osoba 5	1749	1706	97,5
Osoba 6	1689	1837	108,8
Přesnost predikce RMR neuronovou sítí pro všechny osoby			99,7±6,4

Z tabulky 2.14 můžeme vidět, že predikce RMR neuronovou sítí je v průměru $99,7 \pm 6,4$ % ve srovnání s měřenou hodnotou RMR, kdy nejlepší predikce RMR je u osob 2 a 5 (97,5 %) a nejhorší predikce RMR je u osoby 6 (108,8 %). Jak už v této práci bylo zmíněno, za přesnou predikci RMR mezi odborníky se považují hodnoty ± 10 % ve srovnání s měřenou hodnotou RMR. Mohu tedy říct, že se mi podařilo vytvořit kvalitní neuronová síť pro predikci RMR ovšem jenom pro můj datový soubor. Abych mohl říct, že moje neuronová síť poskytuje kvalitní predikci RMR napříč všemi populacemi, musel bych ji vytvořit na větším datovém souboru, jak už jsem dříve zmiňoval.

- **Uživatelské rozhraní (GUI)**

Vytvořil jsem uživatelské rozhraní, ve kterém je implementována moje neuronová síť. Toto GUI by mělo sloužit například pro budoucí aplikaci, která by sloužila k predikci RMR. Dalším důvodem, proč jsem vytvořil uživatelské rozhraní je přehlednější prezentace neuronové sítě a použitelnost pro laickou veřejnost. Do uživatelského rozhraní jsem zahrnul i hodnoty, které určují denní příjem pro hubnutí i nabírání. Dostupné studie ukazují, že ideální kalorický deficit je 500 kcal/den pro zdravou redukci tuku. Toto tvrzení vychází z toho, že optimální úbytek tuku je 0,5kg za týden. Půl kila lidského tuku tvoří 3500 kcal, jestliže tuto hodnotu podělíme sedmi dny v týdnu, dostaneme výslednou hodnotu 500 kcal na den. Naopak pro nabírání tělesné hmotnosti se uvádí hodnota 20 % z RMR. Aby tyto hodnoty mohly být použity v praxi musíme k nim přičíst energii, kterou spálíme v závislosti na dané fyzické aktivitě. [57]

Zadejte Vaše tělesné parametry

Věk	<input type="text" value="23"/>	
Váha (kg)	<input type="text" value="69.5"/>	
Výška (cm)	<input type="text" value="171"/>	
FFM	<input type="text" value="62"/>	
FM	<input type="text" value="7.5"/>	
BMI	<input type="text" value="24"/>	
Pohlaví (muž 0, žena 1)	<input type="text" value="0"/>	
Vaše hodnota RMR je: 2019 kcal/den		
Váš denní příjem kcal pro hubnutí je: 1519 kcal/den		
Váš denní příjem kcal pro nabírání je: 2019 kcal/den		
<input style="border: 1px dashed blue; padding: 5px 15px;" type="button" value="Vypočti"/>		

Obrázek 2.8 Uživatelské rozhraní sloužící k výpočtu RMR

2.7 Diskuse a zhodnocení výsledků

V této bakalářské práci byla použita nepřímá kalorimetrie k měření RMR u 22 jedinců. Dále v této práci bylo použito celkem 32 prediktivních rovnic pro výpočet RMR u všech jedinců, které byly srovnávány s hodnotami RMR získanými nepřímou kalorimetrií. Jedním z omezení této bakalářské práce byla velikost datového souboru (počet měřených osob), dalším omezením byla věková nesourodost mezi jednotlivými osobami a rozdílná fyzická aktivita u jednotlivých osob. Významné statistické rozdíly mezi skupinami žen a mužů byly především ve věku, tělesné hmotnosti, výšce a FFM což pravděpodobně přispělo k rozdílu ve výsledných predikcích RMR. Naopak statisticky nevýznamné rozdíly mezi skupinami žen a mužů byly ve FM a BMI, což poukazuje na to, že obě skupiny lze považovat z hlediska obezity a podvýživy za stejné.

Jedním z cílů této bakalářské práce bylo sledovat vliv pohlaví na RMR. Pro stanovení vlivu pohlaví na RMR pro můj datový soubor jsem využil lineární regresní model, ve kterém byl zohledněn i věk v důsledku nehomogenity datového souboru (velká rozdílnost věku mezi jednotlivými osobami). Lineárnímu regresnímu modelu vysvětlujícímu vliv pohlaví na RMR se zohledněním věku se podařilo vysvětlit 58 % variability závislé proměnné. Na základě tohoto modelu se ukázalo, že ženy mají ve srovnání s muži hodnotu RMR nižší o 325,67 kcal/den vzhledem k věku. Z odborných článků věnujících se této problematice vyplývá, že muži mají v průměru vyšší hodnoty RMR o 5-15 % než ženy, což je způsobené především větším zastoupením svalové tkáně a menším zastoupením tukové tkáně u mužů ve srovnání s ženami. [58] V mém případě se ukázalo, že muži mají v průměru vyšší hodnoty RMR o 12,3 %, což je hodnota, která spadá do intervalu, který byl stanoven na základě několika studií zabývajících se touto problematikou. Vyšší procentuální hodnoty charakterizující rozdíl RMR u mužů a žen můžeme očekávat v případě, kdy testujeme vliv pohlaví na RMR na datovém souboru, který obsahuje například sportující muže a ženy s normálním životním stylem. V tomto případě lze očekávat, že sportující muži budou mít více svalové tkáně a méně tukové tkáně ve srovnání s muži s normálním životním stylem, naproti tomu ženy s normálním životním stylem budou mít méně svalové tkáně a více tukové tkáně ve srovnání se sportujícími ženami. Jestliže se v datovém souboru střetnou zmíněné dvě skupiny (například sportující muži a ženy s normálním životním stylem), tak můžeme očekávat vyšší rozdíl v hodnotách RMR vzhledem k pohlaví, což nastalo v mém případě. Abych mohl stanovit co nejpřesněji vliv pohlaví na RMR potřeboval bych datový soubor, který by obsahoval muže a ženy se stejným životním stylem a shodným věkem.

Hlavním cílem této bakalářské práce bylo porovnat jednotlivé prediktivní rovnice pro určení RMR s hodnotami RMR získanými nepřímou kalorimetrií. Srovnání prediktivních rovnic s měřenou hodnotou RMR jsem provedl na celém datovém souboru, tedy na 22 jedincích, z nichž bylo 14 mužů a 8 žen. Silnými prediktory pro stanovení RMR byly v této práci následující tělesné parametry FFM, výška, věk a váha. Pro stanovení shody mezi predikovanou hodnotou RMR pomocí rovnic a měřenou hodnotou RMR pomocí

nepřímé kalorimetrie jsem v této práci použil čtyři statistické metody, kterými byly procentuální srovnání, korelační analýza, dvouvýběrový párový Studentův test a Bland-Altmanův graf. Je nepravděpodobné, že by různé metody pro stanovení RMR poskytovaly stejné výsledky, ale je důležité, aby rozdíly v přesnosti jednotlivých metod neovlivnily péči o osobu například s těžkou obezitou. Na základě dostupných studií jsem zjistil, že odborníci považují za přesnou predikci RMR, takovou predikci, která odpovídá 90-110 % z měřené hodnoty RMR. [56] V této práci, provedené na střeoevropské populaci se statisticky významnými rozdíly ve věku, tělesné hmotnosti, výšce a FFM, byl značný prostor pro zlepšení výkonu každé prediktivní rovnice. Ukázalo se, že všechny prediktivní rovnice zahrnuté v této práci statisticky významně podhodnocovali RMR ve srovnání s měřenou hodnotou RMR, a to v průměru o $452,8 \pm 125,8$ kcal/den. Toto tvrzení je v souladu s dostupnými studii, které říkají, že dostupné prediktivní rovnice podhodnocují či nadhodnocují RMR v závislosti na sledované lidské rase a na obezitě či podvyživenosti daného jedince. Lze předpokládat, že hodnoty RMR vypočtené pomocí prediktivních rovnic částečně odrážejí charakteristiky populace, ze které byly odvozeny, a mohou tedy postrádat specifitu při aplikaci na jednotlivce odlišné populace. Tato skutečnost může být jedním z hlavních vysvětlení, proč všechny prediktivní rovnice uvedené v této práci podhodnocují RMR. Přesto v tomto datovém souboru byla nejpřesnější shoda mezi měřenou a predikovanou hodnotou RMR poskytnuta dvěma prediktivními rovnicemi odvozenými dle Kortha. Korthova rovnice počítá se 4 tělesnými parametry, kterými jsou váha, výška, pohlaví a věk. Je nutné poznamenat, že u jedné čtvrtiny účastníku měření, Korthova rovnice predikovala RMR mimo 20 % měřeného RMR pomocí nepřímé kalorimetrie. Průměrný rozdíl mezi predikcí RMR Korthovou rovnicí a měřenou hodnotou RMR byl $295,2 \pm 198,8$ kcal/den. Korthova rovnice s FFM počítá pouze s jedním parametrem, kterým je FFM. Korthova rovnice s FFM též predikovala RMR mimo 20 % měřeného RMR pomocí nepřímé kalorimetrie u jedné čtvrtiny účastníků měření. Průměrný rozdíl mezi predikcí RMR Korthovou rovnicí a měřenou hodnotou RMR byl $266,7 \pm 209,8$ kcal/den. Korthova rovnice byla odvozena na 104 subjektech z nichž bylo 50 mužů a 54 žen. Věk sledovaných osob se pohyboval od 21 až do 68 let a průměrná hodnota BMI byla 26. Lze říct, že můj datový soubor, reprezentuje velmi dobře datový soubor, na kterém byly odvozeny Korthovi rovnice, což může být jedním z vysvětlení proč právě v této práci vyšly Korthovi prediktivní rovnice jako nejpřesnější. Můžeme si všimnout, že do Korthových prediktivních rovnic vstupují parametry, které na základě Mannova-Whitneyova testu a t-testu jsou v mém datovém souboru statisticky významné mezi ženami a muži. Jelikož Korthova rovnice neuvažující FFM zohledňuje i pohlaví, tak lze předpokládat, že Korthova rovnice bez FFM bude predikovat hodnoty RMR ve srovnání s měřenými hodnotami RMR s menší odchylkou v závislosti na daném jedinci. Korthova rovnice s FFM počítá pouze s jedním tělesným parametrem, kterým je FFM. Parametr FFM na základě t-testu byl statisticky významný mezi ženami a muži, tudíž můžeme očekávat, že tato rovnice poskytne přesnější predikci

RMR. Jestliže by tyto prediktivní rovnice počítaly s parametry, které by nebyly statisticky významné mezi ženami a muži, tak by to znamenalo, že ženy a muži mají stejné hodnoty FFM a predikce RMR touto rovnicí by byla pro muže i ženy stejná, přičemž víme, že ženy mají zpravidla nižší hodnotu RMR než muži. Nejméně přesná shoda mezi měřenou a predikovanou hodnotou RMR byla poskytnuta Bernsteinovou rovnicí FFM 2. Průměrný rozdíl mezi predikcí RMR Bernsteinovou rovnicí FFM 2 a měřenou hodnotou RMR byl $734,5 \pm 206,1$ kcal/den. Bernsteinova rovnice FFM 2 byla odvozena na 202 obézních osobách, z toho bylo 154 žen a 48 mužů. Domnívám se, že Bernsteinova rovnice FFM 2 poskytla nejméně přesnou predikci z důvodu, že můj datový soubor obsahuje osoby, které mají normální váhu, což se neshoduje s datovým souborem, na kterém byla tato rovnice odvozena. Můžeme taky vidět, že datový soubor, na kterém byla Bernsteinova rovnice FFM 2 odvozena je tvořen z jedné čtvrtiny ženami, přičemž můj datový soubor je tvořen téměř z jedné čtvrtiny muži.

Třetí cíl jsem stanovil na základě hlavního cíle a jeho znění bylo, že jestliže dostupné prediktivní rovnice pro určení RMR budou pro můj datový soubor osob nedostačující, respektive nebudou splňovat pravidlo $\pm 10\%$ z měřené hodnoty RMR, tak odvodím vlastní prediktivní rovnici. Vzhledem k zmíněným nedostatkům mého datového souboru jsem se rozhodl odvodit prediktivní rovnici pro výpočet RMR pouze pro aktivně sportující muže ve věku 20-26 let. Většina prediktivních rovnic je založena na snadno měřitelných parametrech jako je tělesná hmotnost, výška a věk, zatímco některé vycházejí z parametrů složení těla jako je FFM, FM a celková tělesná voda (TBW). Nejnovější studie říkají, že FFM ve srovnání s tělesnou hmotností je přesnějším parametrem pro predikci RMR.[18] Pro skupinu mužů ve věku od 20 do 26 let v této práci byla FFM nejsilnějším prediktorem RMR. Tato skutečnost se dala předpovídat, protože muži, kteří byli použiti pro odvození prediktivní rovnice aktivně dělali jiné sporty (například fotbal, ragby, florbal, baseball a cyklistiku), což poukazuje na to, že muži v závislosti na provádění sport budou mít vyšší nebo nižší svalovou hmotu. Lineární regresní model vysvětlující závislost FFM na RMR jsem považoval za nulový (nejlepší) model, ke kterému jsem následně pomocí dopředné krokové metody přidával další tělesné parametry (nezávislé proměnné) a sledoval jsem, zda daný tělesný parametr v naší do modelu nové statisticky významné informace. Při vkládání tělesných parametrů k modelu se ukázalo, že jako jediná statisticky významná nezávislá proměnná byl věk. Tudíž výsledný lineární regresní model byl tvořen dvěma nezávislými proměnnými, kterými byla FFM a věk. Koefficient determinace byl pro tento model 0,90, tudíž můžu říct, že konečnému modelu pro predikci RMR se podařilo vysvětlit 90 % variability nezávislé proměnné. Provedl jsem testování odvozené rovnice na dvou mužích. U obou testovaných mužů byla predikována hodnota RMR odvozenou rovnicí v rozsahu $\pm 10\%$ z měřené hodnoty, což lze považovat za dobré výsledky, ale z hlediska počtu testovaných mužů, nelze vyhodnotit s jakou přesností predikuje odvozená rovnice RMR ve srovnání s měřenou hodnotou na nových osobách, na kterých nebyla rovnice odvozena.

Posledním cílem této bakalářské práce bylo vytvořit postup pro predikci RMR pomocí strojového učení (neuronová síť). V žádné dostupné studii jsem nenašel, že by se někdo zabýval neuronovými sítěmi pro predikci RMR, v čemž pravděpodobně bude tento přístup unikátní. Vytvořil jsem tedy neuronovou síť pro predikci RMR, která byla trénována na 16 osobách a testována na 6 osobách. Použil jsem 7 tělesných parametrů, které byly pro každou osobu individuální. Jednalo se o následující tělesné parametry věk, váha, výška, FFM, FM, BMI a pohlaví. Neuronová síť by měla sloužit pro predikci RMR u mužů a žen ve věku od 20-60 let, bez ohledu na tělesnou skladbu daného jedince. Neuronová síť pro predikci RMR považovala za nejsilnější prediktory RMR váhu, výšku, FFM a FM. Méně silnými prediktory RMR byl věk a pohlaví. Všechny tělesné parametry se v neuronové síti významně podílely na predikci RMR, tudíž jsem neprováděl selekci příznaků (tělesných parametrů). Celkový výkon neuronové sítě pro predikci RMR byl $99,7 \pm 6,4$ %, což mohou být zkreslené výsledky, z důvodu malého počtu testovaných osob. Jelikož jsem nenašel, žádnou studii zabývající se stejnou problematikou, tak nemám možnost porovnat výsledky s nějakou jinou neuronovou sítí pro predikci RMR. Mohu, ale porovnat neuronovou síť pro predikci RMR s dostupnými prediktivními rovnicemi. Pro můj datový soubor osob se jednoznačně ukazuje, že neuronová síť poskytuje lepší predikci RMR než dostupné prediktivní rovnice, což může být zapříčiněno tím, že moje neuronová síť je dokonale naučená na danou populaci, zatímco prediktivní rovnice jsou odvozené na jiných nebo podobných populacích, ale ne totožných. Neuronová síť, která by byla trénována na velkém datovém souboru, který by obsahoval osoby napříč všemi populacemi, by mohla nahradit zdlouhavé a technicky náročné měření RMR.

V závěru diskuse bych chtěl uvést pár poznatků k metodice měření. Při měření nepřímou kalorimetrií je důležité, aby měřená osoba dodržela dobu lačnění minimálně 12 hodin před začátkem měření a nepožila 48 hodin před měřením jídlo bohaté na bílkoviny. Dále měřená osoba nesmí 12 hodin před měřením požit alkohol, kofein a nikotin, a neměla by sportovat 48 hodin před měřením. Tyto požadavky je těžké ověřit, při nesplnění těchto podmínek je výsledné měření negativně ovlivněno. Dalším důležitým faktorem pro dosažení co nejpřesnějších výsledků je, aby měřená osoba setrvala v klidu na lehátku po dobu 30 minut. Tento faktor je problematický u lidí, kteří nejsou schopni ležet v klidu na lehátku 30 minut. Může to být pro ně stresová situace, která se projeví na výsledném měření. U těchto osob by bylo dobré stanovit jiný postup pro dosažení klidového stavu. Pro dosažení správných výsledků je důležité, aby měření probíhalo v odhlučněné místnosti, nebo v místnosti, kde je zajištěno absolutní ticho. Okolní šum a zvuky opět mohou měřenou osobu vyvést z klidového stavu. Domnívám se, že měření může být negativně ovlivněno maskou, která měří průtok vzduchu a je umístěna na obličeji měřené osoby. Tato maska musí být na obličej nasazena velmi pevně, aby proudící vzduch neunikal mimo masku, což je samo osobě velmi nepříjemné. Podle mě je to jeden z největších problémů, protože i když jsou dodrženy všechny podmínky pro správné měření, tak samotný přístroj měřenou osobu vyvádí z klidu.

3. ZÁVĚR

Tato bakalářská práce byla rozdělena do dvou hlavních kapitol. V první kapitole jsem se zabýval teoretickým popisem lidského metabolismu a popisem celkového energetického výdeje a faktory, které ho ovlivňují. Dále jsem se v teoretické části zabýval jednotlivými metodami měření RMR. Podstatnou úlohou bylo v teoretické části nashromáždit dostupné prediktivní rovnice pro určení RMR a popsat na jaké skupině byly odvozené a jakým způsobem.

Pro splnění zadání této bakalářské práce bylo důležité provést vlastní měření v laboratoři CESA, jednalo se o nepřímou kalorimetrii a InBody 770. Bohužel z důvodu pandemických opatření se mi nepodařilo naměřit dostatečný počet osob. Tato skutečnost byla velkou nevýhodou pro následné splnění cílů této bakalářské práce. Z tohoto důvodu jsem nesplnil pátý bod zadání, protože abych mohl stanovit, jak dalece ovlivňuje složení posledního jídla celkově výsledky měření, tak bych musel každou osobu změřit minimálně dvakrát. Daná osoba by například před prvním měření požíla jídlo bohaté na bílkoviny a před druhým měřením by nepožila bílkoviny 42 hodin před měřením.

V druhé části této bakalářské práce (praktická část) jsem si stanovil čtyři cíle. Sledoval jsem vliv pohlaví na RMR se zohledněním věku. Ukázalo se, že vliv pohlaví hraje statisticky významnou roli při stanovení RMR. Ženy ve srovnání s muži (vzhledem k věku) mají hodnoty RMR nižší o 325,67 kcal/den. Poté jsem porovnával prediktivní rovnice pro stanovení RMR s nepřímou kalorimetrií. Na základě čtyř statistických metod se ukázalo, že všechny prediktivní rovnice zahrnuté v této práci výrazně podhodnocovaly RMR ve srovnání s měřenou hodnotou (nepřímá kalorimetrie), přesto nejlepší predikci poskytla Korthova rovnice ($266,7 \pm 209,8$) a nejhorší predikci poskytla Bernsteinova rovnice FFM 2 ($734,5 \pm 206,1$). Následně jsem vytvořil vlastní postup pro predikci RMR. K tomu jsem použil dvě metody – lineární regresní model a neuronovou síť. Vzhledem k relativně nízkému počtu měřených osob a jejich značné variabilitě zejména ve věku jsem se rozhodl vytvořit rovnici pro homogennější podskupinu sportujících mužů ve věku od 20 do 26 let. S pomocí lineární regrese jsem získal rovnici zahrnující dva tělesné parametry, kterými jsou FFM a věk. Nová rovnice fungovala dobře, ale pouze na dvou testovaných mužích a vykazovala dobrou shodu s měřenými hodnotami RMR. Neuronovou síť jsem vytvořil z celého datového souboru, přičemž 16 osob jsem použil pro trénování sítě a 6 osob jsem použil pro testování sítě. Tato neuronová síť by měla sloužit k predikci RMR jak pro ženy, tak i pro muže. Při testování vykazovala vytvořená síť dobrou shodu s měřenými hodnotami RMR, ovšem to nelze považovat za relevantní výsledky, protože testování, jak už jsem zmiňoval, jsem provedl pouze na 6 osobách.

Dle mého názoru by bylo zajímavé, kdyby byla zpracována podobná práce, která by se věnovala větší homogennější skupině. Jelikož jsem nenašel žádnou studii, která by se zabývala neuronovými sítěmi pro predikci RMR, tak by mohl být velký potenciál neuronových sítí nahradit zdoluhavé a technicky náročné měření.

LITERATURA

- [1] DOSTÁL, Jiří. *Biochemie: pro posluchače bakalářských oborů*. Brno: Masarykova univerzita, 2009. ISBN 978-80-210-5020-4.
- [2] SVAČINA, Štěpán. *Poruchy metabolismu a výživy*. Praha: Galén, c2010. ISBN 9788072626762.
- [3] BUŽGA, Marek. *Praktická cvičení z fyziologie*. Vyd. 2. Ostrava: Ostravská univerzita v Ostravě, 2007. ISBN 978-80-7368-465-5.
- [4] KLIMEŠOVÁ, Iva. *Základy sportovní výživy*. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, 2015. ISBN 978-80-244-4833-6.
- [5] VILIKUS, Zdeněk. *Výživa sportovců a sportovní výkon*. 2. vydání. Praha: Univerzita Karlova v Praze, nakladatelství Karolinum, 2015. ISBN 9788024631523.
- [6] MANORE, Melinda, Nanna L. MEYER a Janice THOMPSON. *Sport nutrition for health and performance*. 2nd ed. Champaign, IL: Human Kinetics, c2009. ISBN 9780736052955.
- [7] *Krause's food & the nutrition care process*. Edited by L. Kathleen Mahan - Sylvia Escott-Stump - Janice G. Raymond - Marie V. 13th ed. St. Louis, Mo.: Elsevier/Saunders, 2012. xix, 1227. ISBN 9781437722338.
- [8] COULSTON, Ann M.; BOUSHEY, Carol J. *Nutrition in the prevention and treatment of disease*. Burlington MA. 2008. ISBN 9780123741189.
- [9] TROJAN, Stanislav. *Lékařská fyziologie*. Vyd. 4., přeprac. a dopl. Praha: Grada, 2003. ISBN 80-247-0512-5.
- [10] ZADÁK, Zdeněk. *Výživa v intenzivní péči*. 2., rozš. a aktualiz. vyd. Praha: Grada, 2008. ISBN 978-80-247-2844-5.
- [11] PÁNEK, Jan. *Základy výživy*. Praha: Svoboda Servis, 2002. ISBN 80-86320-23-5.
- [12] MATALOVÁ, Eva. *Fyziologie člověka: praktická cvičení pro studenty Farmaceutické fakulty VFU Brno*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006. ISBN 80-7204-485-0.
- [13] NOVÁKOVÁ, Zuzana a Robert ROMAN. *Praktická cvičení z fyziologie*. Brno: Masarykova univerzita, 2007. ISBN 978-80-210-4391-6.
- [14] STEWART, Christina L., Cynthia M. GOODY a Richard BRANSON. *Comparison of Two Systems of Measuring Energy Expenditure*. *Journal of Parenteral and Enteral Nutrition* [online]. 2017, 29(3), 212-217 [cit. 2020-12-29]. ISSN 0148-6071.
- [15] HOLEČEK, Milan. *Regulace metabolismu cukrů, tuků, bílkovin a aminokyselin*. Praha: Grada, 2006, ISBN 80-247-1562-7.
- [16] HARRIS, J. A. a F. G. BENEDICT. *A Biometric Study of Human Basal Metabolism*. *Proceedings of the National Academy of Sciences* [online]. 1918, 4(12), 370-373 [cit. 2020-11-07]. ISSN 0027-8424.
- [17] BERNSTEIN, R S, J C THORNTON, M U YANG, J WANG, A M REDMOND, R N PIERSON, F X PI-SUNYER a T B VAN ITALLIE. *Prediction of the resting*

- metabolic rate in obese patients.* The American Journal of Clinical Nutrition [online]. 1983, 37(4), 595-602 [cit. 2020-11-08]. ISSN 0002-9165.
- [18] ALMAJWAL, Ali M. a Mahmoud M. A. ABULMEATY. New Predictive Equations for Resting Energy Expenditure in Normal to Overweight and Obese Population. *International Journal of Endocrinology* [online]. 2019, **2019**, 1-15 [cit. 2021-5-17]. ISSN 1687-8337. Dostupné z: doi:10.1155/2019/5727496
- [19] OWEN, O E, E KAVLE, R S OWEN, et al. A reappraisal of caloric requirements in healthy women. *The American Journal of Clinical Nutrition* [online]. 1986, **44**(1), 1-19 [cit. 2021-5-17]. ISSN 0002-9165. Dostupné z: doi:10.1093/ajcn/44.1.1
- [20] OWEN, O E, J L HOLUP, D A D’ALESSIO, et al. A reappraisal of the caloric requirements of men. *The American Journal of Clinical Nutrition* [online]. 1987, **46**(6), 875-885 [cit. 2021-5-17]. ISSN 0002-9165. Dostupné z: doi:10.1093/ajcn/46.6.875
- [21] LIVINGSTON, Edward H. a Ingrid KOHLSTADT. Simplified Resting Metabolic Rate-Predicting Formulas for Normal-Sized and Obese Individuals. *Obesity Research* [online]. 2005, **13**(7), 1255-1262 [cit. 2021-5-17]. ISSN 10717323. Dostupné z: doi:10.1038/oby.2005.149
- [22] WN, Schofield. *Predicting basal metabolic rate, new standards and review of previous work: Hum Nutr Clin Nutr.* [online]. 1985, , 39 Suppl 1:5-41 [cit. 2021-5-17]. Dostupné z: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/4044297/>
- [23] *Energy and protein requirements.* Geneva, Report of a joint FAO/WHO/UNU Expert Consultation. World Health Organ Tech Rep Ser. 1985; 724:1-206 [cit. 2021-5-17]. PMID: 3937340. Dostupné z: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/3937340/>
- [24] HENRY, CJK. *Basal metabolic rate studies in humans: measurement and development of new equations.* Public Health Nutrition [online]. 2005, 8(7a), 1133-1152 [cit. 2020-11-08]. ISSN 1368-9800.
- [25] MÜLLER, Manfred J, Anja BOSY-WESTPHAL, Susanne KLAUS, et al. *World Health Organization equations have shortcomings for predicting resting energy expenditure in persons from a modern, affluent population: generation of a new reference standard from a retrospective analysis of a German database of resting energy expenditure.* The American Journal of Clinical Nutrition [online]. 2004, 80(5), 1379-1390 [cit. 2020-11-08]. ISSN 0002-9165.
- [26] KORTH, O, A BOSY-WESTPHAL, P ZSCHOCHÉ, C C GLÜER, M HELLER a M J MÜLLER. *Influence of methods used in body composition analysis on the prediction of resting energy expenditure.* European Journal of Clinical Nutrition [online]. 2007, 61(5), 582-589 [cit. 2020-11-08]. ISSN 0954-3007.
- [27] DE LORENZO, A, A TAGLIABUE, A ANDREOLI, G TESTOLIN, M COMELLI a P DEURENBERG. *Measured and predicted resting metabolic rate in Italian males and females, aged 18–59 y.* European Journal of Clinical Nutrition [online]. 2001, 55(3), 208-214 [cit. 2020-11-08]. ISSN 0954-3007.

- [28] LAZZER, S., F. AGOSTI, P. SILVESTRI, H. DERUMEAUX-BUREL a A. SARTORIO. *Prediction of resting energy expenditure in severely obese Italian women*. Journal of Endocrinological Investigation [online]. 2007, 30(1), 20-27 [cit. 2020-11-08]. ISSN 0391-4097.
- [29] LAZZER, S., F. AGOSTI, M. RESNIK, N. MARAZZI, D. MORNATI a A. SARTORIO. *Prediction of resting energy expenditure in severely obese Italian males*. Journal of Endocrinological Investigation [online]. 2007, 30(9), 754-761 [cit. 2020-11-08]. ISSN 0391-4097.
- [30] HUANG, Kuo-Chin, Nic KORMAS, Katharine STEINBECK, Georgina LOUGHNAN a Ian D. CATERSON. *Resting Metabolic Rate in Severely Obese Diabetic and Nondiabetic Subjects*. Obesity Research [online]. 2004, 12(5), 840-845 [cit. 2020-11-08]. ISSN 10717323.
- [31] JOHNSTONE, A M, K A RANCE, S D MURISON, J S DUNCAN a J R SPEAKMAN. *Additional anthropometric measures may improve the predictability of basal metabolic rate in adult subjects*. European Journal of Clinical Nutrition [online]. 2006, 60(12), 1437-1444 [cit. 2020-11-08]. ISSN 0954-3007.
- [32] ROZA, A M a H M SHIZGAL. *The Harris Benedict equation RMRvaluated: resting energy requirements and the body cell mass*. The American Journal of Clinical Nutrition [online]. 1984, 40(1), 168-182 [cit. 2020-11-24]. ISSN 0002-9165.
- [33] WEIJS, Peter JM. *Validity of predictive equations for resting energy expenditure in US and Dutch overweight and obese class I and II adults aged 18–65 y*. The American Journal of Clinical Nutrition [online]. 2008, 88(4), 959-970 [cit. 2021-01-05]. ISSN 0002-9165.
- [34] STIPANUK, Martha H. a Marie A. CAUDILL. *Biochemical, physiological, and molecular aspects of human nutrition*. 3rd ed. St. Louis, Mo.: Elsevier, c2013. ISBN 9781437709599.
- [35] SERGI, Giuseppe, Alessandra COIN, Sara MARIN, et al. *Body composition and resting energy expenditure in elderly male patients with chronic obstructive pulmonary disease*. Respiratory Medicine [online]. 2006, **100**(11), 1918-1924 [cit. 2021-03-22]. ISSN 09546111.
- [36] LIFSON, N. a Ruth MCCLINTOCK. *Theory of use of the turnover rates of body water for measuring energy and material balance*. Journal of Theoretical Biology [online]. 1966, **12**(1), 46-74 [cit. 2021-03-23]. ISSN 00225193.
- [37] PARK, Jonghoon, Ishikawa-Takata KAZUKO, Eunkyung KIM, Jeonghyun KIM a Jinsook YOON. *Estimating fRMR-living human energy expenditure: Practical aspects of the doubly labeled water method and its applications*. Nutrition Research and Practice [online]. 2014, **8**(3) [cit. 2021-03-24]. ISSN 1976-1457.
- [38] LARSSON, Caroline, Anne VITGER, Rasmus B JENSEN, Peter JUNGHANS a Anne-Helene TAUSON. *Evaluation of the oral ¹³C-bicarbonate technique for measurements of energy expenditure in dogs before and after body weight*

- reduction*. Acta Veterinaria Scandinavica [online]. 2014, **56**(1) [cit. 2021-03-24]. ISSN 1751-0147. Dostupné z: doi:10.1186/s13028-014-0087-6
- [39] NIEMAN, David C., Melanie D. AUSTIN, Laura BENEZRA, Steven PEARCE, Tim MCINNIS, Jess UNICK a Sarah J. GROSS. *Validation of Cosmed's FitMate™ in Measuring Oxygen Consumption and Estimating Resting Metabolic Rate*. Research in Sports Medicine [online]. 2006, **14**(2), 89-96 [cit. 2021-03-24]. ISSN 1543-8627. Dostupné z: doi:10.1080/15438620600651512
- [40] SKENDERI, Durim. *Acute response in body composition to fed versus fasted high intensity training in young healthy men* [online]. 2020,1-23 [cit. 2021-5-21]. Dostupné z: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1522183/FULLTEXT02.pdf>
- [41] HENDL, Jan. *Přehled statistických metod zpracování dat: analýza a metaanalýza dat*. Vyd. 2., opr. Praha: Portál, 2006. ISBN 80-7367-123-9.
- [42] PROCHÁZKA, Bohumír. *Biostatistika pro lékaře: principy základních metod a jejich interpretace*. Praha: Karolinum, 1999. ISBN 80-7184-987-1.
- [43] MRKVIČKA, Tomáš a Vladimíra PETRÁŠKOVÁ. *Úvod do statistiky*. České Budějovice: Jihočeská univerzita, 2006. ISBN 80-7040-894-4.
- [44] RAMÍK, Jaroslav a Šárka ČEMERKOVÁ. *Kvantitativní metody B: statistika : distanční studijní opora*. Karviná: Slezská univerzita v Opavě, Obchodně podnikatelská fakulta v Karviné, 2003. ISBN 80-7248-198-3.
- [45] BÍLKOVÁ, Diana, Petr BUDINSKÝ a Václav VOHÁNKA. *Pravděpodobnost a statistika*. Plzeň: Vydavatelství a nakladatelství Aleš Čeněk, 2009. ISBN 978-80-7380-224-0.
- [46] MANDELOVÁ, Lucie a Iva HRNČIŘÍKOVÁ. *Základy výživy ve sportu*. Brno: Masarykova univerzita, 2007. ISBN 978-80-210-4281-0.
- [47] FRINGS-MEUTHEN, Petra, Sara HENKEL, Michael BOSCHMANN, et al. *Resting Energy Expenditure of Master Athletes: Accuracy of Predictive Equations and Primary Determinants*. Frontiers in Physiology [online]. 2021, **12** [cit. 2021-5-17]. ISSN 1664-042X. Dostupné z: doi:10.3389/fphys.2021.641455
- [48] JOSEPH, Mini, RiddhiDas GUPTA, L PREMA, Mercy INBAKUMARI a Nihal THOMAS. *Are predictive equations for estimating resting energy expenditure accurate in Asian Indian male weightlifters?* Indian Journal of Endocrinology and Metabolism [online]. 2017, **21**(4) [cit. 2021-5-12]. ISSN 2230-8210. Dostupné z: doi:10.4103/ijem.IJEM_563_16
- [49] GARROW, J.S. a Joan WEBSTER. *ARE PRE-OBESE PEOPLE ENERGY THRIFTY?* The Lancet [online]. 1985, **325**(8430), 670-671 [cit. 2021-5-12]. ISSN 01406736. Dostupné z: doi:10.1016/S0140-6736(85)91330-3
- [50] BALCI, Aydın, Ebru Arslanoğlu BADEM, Ayfer Ezgi YILMAZ, et al. *Current Predictive Resting Metabolic Rate Equations Are Not Sufficient to Determine Proper Resting Energy Expenditure in Olympic Young Adult National Team Athletes*. Frontiers in Physiology [online]. 2021, **12** [cit. 2021-5-12]. ISSN 1664-042X. Dostupné z: doi:10.3389/fphys.2021.625370

- [51] DERKSEN, Shelley a H. J. KESELMAN. *Backward, forward and stepwise automated subset selection algorithms: Frequency of obtaining authentic and noise variables*. British Journal of Mathematical and Statistical Psychology [online]. 1992, **45**(2), 265-282 [cit. 2021-5-15]. ISSN 00071102. Dostupné z: doi:10.1111/j.2044-8317.1992.tb00992.x
- [52] FAUSETT, Laurene. *Fundamentals of Neural Networks: Architectures, Algorithms And Applications*. Prentice-Hall, 1994. ISBN 978-0-13-334186-7.
- [53] MASTERS, Timothy. *Practical Neural Network Recipes in C++*. San Francisco: Morgan Kaufmann, 1993. ISBN 978-0-12-479040-7.
- [54] MANNING, Timmy, Roy D SLEATOR a Paul WALSH. *Biologically inspired intelligent decision making*. Bioengineered [online]. 2014, **5**(2), 80-95 [cit. 2021-5-16]. ISSN 2165-5979. Dostupné z: doi:10.4161/bioe.26997
- [55] LV, Chen, Yang XING, Junzhi ZHANG, Xiaoxiang NA, Yutong LI, Teng LIU, Dongpu CAO a Fei-Yue WANG. *Levenberg–Marquardt Backpropagation Training of Multilayer Neural Networks for State Estimation of a Safety-Critical Cyber-Physical System*. IEEE Transactions on Industrial Informatics [online]. 2018, **14**(8), 3436-3446 [cit. 2021-5-16]. ISSN 1551-3203. Dostupné z: doi:10.1109/TII.2017.2777460
- [56] ALIASGHARZADEH, Soghra, Reza MAHDAVI, Mohammad MOHAMMAD ASGHARI JAFARABADI a Nazli NAMAZI. *Comparison of Indirect Calorimetry and Predictive Equations in Estimating Resting Metabolic Rate in Underweight Females* [online]. 2015,6, 44 (6): 822–829 [cit. 2021-5-17]. Dostupné z: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4524307/>
- [57] FINKLER, Elissa, Steven B. HEYMSFIELD a Marie-Pierre ST-ONGE. Rate of Weight Loss Can Be Predicted by Patient Characteristics and Intervention Strategies. *Journal of the Academy of Nutrition and Dietetics* [online]. 2012, **112**(1), 75-80 [cit. 2021-5-24]. ISSN 22122672. Dostupné z: doi:10.1016/j.jada.2011.08.034
- [58] WU, Betty N. a Anthony J. O'SULLIVAN. Sex Differences in Energy Metabolism Need to Be Considered with Lifestyle Modifications in Humans. *Journal of Nutrition and Metabolism* [online]. 2011, **2011**, 1-6 [cit. 2021-5-24]. ISSN 2090-0724. Dostupné z: doi:10.1155/2011/391809
- [59] HK MONTROYE, Alexander, Joseph D. VONDRASEK a James B. HANCOCK. *Validity and Reliability of the VO2 Master Pro for Oxygen Consumption and Ventilation Assessment* [online]. 2020,13(4), 1382-1401 [cit. 2021-5-25]. Dostupné z: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7523887/>

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratky:

ATP	Adenosintrifosfát
CO ₂	Oxid uhličitý
O ₂	Kyslík
TEE	Celkový energetický výdej
TEF	Termický efekt potravy
BMR	Bazální metabolismus
RMR	Klidový metabolismus
REE	Klidový energetický výdej
EEK	Energetický ekvivalent
Q _n	Spalné teplo
RQ	Respirační kvocient
VO ₂	Spotřeba kyslíku
VCO ₂	Výdej oxidu uhličitého
FO ₂	Frakční koncentrace kyslíku
FCO ₂	Frakční koncentrace oxidu uhličitého
TBW	Množství vody v organismu
M	Představuje rovnici určenou pro muže
Ž	Představuje rovnici určenou pro ženy
SD	Směrodatná odchylka
IS	95 % interval spolehlivosti
T	Testové kritérium

Symboly:

<i>FM</i>	množství tukové hmoty	[kg]
<i>FFM</i>	tělesná hmota bez tukové hmoty	[kg]
<i>BMI</i>	index tělesné hmotnosti	[kg/m ²]
<i>Váha</i>	tělesná hmotnost	[kg]
<i>Výška</i>	tělesná výška	[cm]
<i>Pohlaví</i>	muž 0, žena 1	[-]

SEZNAM PŘÍLOH

PŘÍLOHA A - MATLAB SKRIPTY	74
PŘÍLOHA B - NAMĚŘENÉ HODNOTY	75

Příloha A - Matlab skripty

A.1 Statistika

Skript, který slouží k výpočtu jednotlivých statistických metod zahrnutých v této práci. Ke skriptu jsou přiložené datové soubory, tudíž ke spuštění stačí kliknout na tlačítko „run“.

A.2 Síť a GUI

Skript obsahuje neuronovou síť pro predikci RMR, výpočty pro testování neuronové sítě a příslušnou statistiku. Opět přikládám vstupní datové soubory, tudíž stačí neuronovou síť pouze spustit. Skript GUI je propojen se skriptem síť a reprezentuje neuronovou síť pro predikci RMR ve formě uživatelského rozhraní.

A.3 NP_RMR

Tento skript slouží k výpočtu RMR z křivek VO_2 , VCO_2 a RQ, které byly získány vlastním měřením (nepřímá kalorimetrie).

A.4 Rovnice

V tomto skriptu je hlavní funkce pro výpočet RMR dle dané prediktivní rovnice. Pod tento skript spadá dalších 18 pod funkcí, které reprezentují jednotlivé prediktivní rovnice. Tento skript se opět pouští pouze tlačítkem „run“.

Příloha B - Naměřené hodnoty

	Věk	Váha	Výška	FFM	FM	BMI	Pohlaví	RMR
	[1]	[kg]	[cm]	[kg]	[kg]	[kg/m ²]	[-]	[kcal/den]
Osoba 1	21,0	93,7	181,0	76,9	16,8	29,0	Muž	2552
Osoba 2	23,0	69,5	171,0	62,0	7,5	24,0	Muž	2070
Osoba 3	21,0	89,5	176,8	73,1	16,4	29,0	Muž	2546
Osoba 4	23,0	70,8	182,2	65,5	5,3	21,0	Muž	2174
Osoba 5	21,0	87,3	186,4	72,8	14,5	25,0	Muž	2407
Osoba 6	20,0	72,4	182,1	68,6	3,8	22,0	Muž	2262
Osoba 7	20,0	84,5	184,0	68,0	16,5	26,0	Muž	2315
Osoba 8	23,0	79,7	188,0	70,2	9,5	23,0	Muž	1595
Osoba 9	26,0	77,4	186,4	70,5	6,9	22,0	Muž	2107
Osoba 10	26,0	75,8	193,8	70,2	5,6	20,2	Muž	2650
Osoba 11	25,0	109,0	189,5	83,0	26,0	30,4	Muž	1802
Osoba 12	56,0	94,0	176,9	70,5	23,5	31,0	Muž	2244
Osoba 13	38,0	82,5	170,0	59,8	22,7	28,5	Muž	2764
Osoba 14	44,0	76,8	179,8	56,0	20,8	23,8	Muž	2483
Osoba 15	53,0	63,1	170,2	52,7	10,4	22,0	Žena	2323
Osoba 16	44,0	92,5	171,4	55,4	37,1	29,0	Žena	1689
Osoba 17	28,0	67,6	176,0	49,9	17,7	22,0	Žena	1967
Osoba 18	22,0	74,4	169,0	51,1	23,3	26,0	Žena	1932
Osoba 19	44,0	52,8	154,8	38,5	14,3	22,0	Žena	1822
Osoba 20	50,0	89,7	164,9	55,8	33,9	33,0	Žena	2325
Osoba 21	35,0	57,9	163,6	47,5	10,4	21,6	Žena	1821
Osoba 22	30,0	65,1	173,7	47,1	18,0	21,6	Žena	1749