

Porównanie metod określania wydatku energetycznego na przykładzie leśnictwa

Comparing methods of energy expenditure estimation using forestry as an example

Witold Grzywiński*, Piotr S. Mederski, Mariusz Bembenek

Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu, Wydział Leśny, Katedra Użytkowania Lasu,
ul. Wojska Polskiego 71A, 60–625 Poznań

*tel. +48 61 8487588, fax +48 61 8487755, e-mail: witold.grzywinski@up.poznan.pl

Abstract. In this paper the values of energy expenditure obtained with estimative methods (tables of energy expenditure, Lehmann's method) were compared to the data obtained with a method based on pulmonary ventilation measurements. Thereby, the usefulness of estimative methods for determining energy expenditure on work stations in forestry was tested.

We compared energy expenditures for 30 forestry work stations within which 59 different activities were distinguished. For each activity the energy expenditure was determined utilizing the three following methods: pulmonary ventilation measurement, tables of energy expenditure and Lehmann's method.

The percentage error in energy expenditure for particular activities determined with tables ranged from -44.47% to 42.31%. The highest representation of error value (52.8%) varied between -19.9% and 5.0%. The error in energy expenditure estimation determined with Lehmann's method is characterized by a smaller variability ranging from -31.35% to 34.13%. The highest density of error values was found in the range from -4.9% to 10.0%, which comprises 44.1% of the results. To conclude, the use of tables resulted in an underestimation of the energy expenditure value for 64.1% of activities, whereas the use of Lehmann's method resulted in an underestimation in 49.1% of the cases.

Key words: energy expenditure, comparison of methods, forestry

1. Wstęp

Wydatek energetyczny (*WE*) pracy zawodowej jest wielkością służącą do oceny obciążenia pracą fizyczną. Powszechnie wykorzystywana jest w tym celu metoda gazometryczna (kalorymetrii pośredniej) bazująca na wielkości zużycia tlenu. Jest to metoda wiarygodna, jednak wymaga zastosowania specjalistycznej aparatury pomiarowej. W praktyce przemysłowej do pomiaru *WE* stosuje się często uproszczoną wersję metody kalorymetrii pośredniej, a mianowicie pomiar wentylacji płuc, czyli objętości wydychanego lub wdychanego powietrza (Koradecka, Bugajska 1998).

Określając wydatek energii, w przypadku braku możliwości zastosowania metod pomiarowych, można

posiłkować się metodami szacunkowymi (metodami tabelaryczno-chronometrażowymi): zestawieniami tabelarycznymi oraz metodą Lehmana. W obu metodach w celu oszacowania obciążenia energetycznego zmiany roboczej należy przeprowadzić fotografię dnia pracy i ustalić udział poszczególnych czynności roboczych.

W metodzie zestawień tabelarycznych wykorzystuje się dostępne w literaturze wielkości *WE* z opublikowanych dotychczas wyników badań. Zestawienia *WE* w leśnictwie zawierają prace m.in. Jakubowskiego (1973), Fibigera (1976), Fibigera i Rogozińskiego (1977), Józefaciuka i Nowackiej (1993) oraz Grzywińskiego (2007). Korzystając z tabel, należy pamiętać o możliwości występowania znacznych różnic wynikających m.in. z postępu technicznego, tempa pracy, wielkości

przemieszczanych ciężarów, organizacji pracy, warunków terenowych i meteorologicznych itp.

W metodzie Lehmana jednostkowy wydatek energii dla poszczególnych czynności ustala się dwuetapowo. W pierwszym etapie dokonuje się oceny pozycji ciała podczas pracy i na podstawie wartości tabelarycznych określa się WE , wynikający z utrzymania określonej pozycji. W etapie drugim na podstawie analizy czynności roboczych ocenia się główne grupy mięśni zaangażowanych w ich wykonywanie oraz intensywność wysiłku. Następnie, wykorzystując kolejną tabelę, ustala się wydatek energii związany z wykonywaniem danej czynności. Koszt energetyczny netto pracy jest sumą wyników uzyskanych w obu etapach (Lehmann 1966). Należy pamiętać, że tabele dotyczą kosztu energetycznego pracy mężczyzn. W przypadku kobiet należy wartości z tabel przemnożyć przez współczynnik 0,80–0,85. Zmodyfikowana metoda Lehmana jest wykorzystywana do określania tempa metabolizmu związanego z pozycją ciała, rodzajem pracy i ruchem ciała, odniesionych do intensywności pracy (PN-EN ISO 8996:2005).

Według różnych autorów stosowanie metod tabelaryczno-chronometrycznych pozwala na określenie WE z dokładnością do ok. 10–20% (Konarska 1985; Koradecka, Sawicka 1987; Rogoziński 1988; Pałka 1990; Dębowski, Spioch 1992). Sowa i Kulak (1999), analizując kilka czynności z zakresu pozyskania drewna, stwierdzili duże wartości błędów szacunkowego określania wydatku energii, dochodzące prawie do 74%. Według autorów metoda zestawień tabelarycznych daje znacznie większe błędy niż metoda Lehmana, prowadząc do zawyżania WE poszczególnych czynności oraz znacząco zmieniając obraz dziennego obciążenia pracą poprzez kumulację wartości wydatku energii dla kolejnych czynności wykonywanych na stanowisku roboczym.

Celem niniejszej pracy jest skonfrontowanie prostych w zastosowaniu metod szacowania WE z danymi uzyskanymi metodą opartą na pomiarze wentylacji płuc i ocena przydatności metod szacunkowych do określania obciążenia energetycznego na stanowiskach pracy w leśnictwie.

2. Metody badań

Porównanie wielkości WE przeprowadzono dla 30 prac leśnych reprezentujących podstawowe działy gospodarki leśnej (hodowlę, ochronę i użytkowanie lasu). W analizowanych pracach wyróżniono 59 czynności, dla których ustalono wartość WE trzema metodami: pomiarową – pomiar wentylacji płuc (miernik wydatku energii $MWE-1$), zestawień tabelarycznych i Lehmana.

Przy analizie wyników jako podstawową przyjęto wartość WE otrzymaną metodą pomiaru wentylacji płuc za pomocą miernika wydatku energetycznego $MWE-1$. Bazuje ona na istnieniu prawie liniowej zależności pomiędzy wielkością zużycia tlenu podczas wysiłku a wielkością minutowej wentylacji płuc (Kozłowski, Nazar 1999). Pomiar wentylacji płuc i wydatku energetycznego prowadzono zgodnie z metodyką zalecaną w literaturze (Koradecka, Bugajska 1998; Makowiec-Dąbrowska et al. 2000).

Dla wielkości WE określonych metodami Lehmana i zestawień tabelarycznych obliczono błąd procentowy wtórny (P_{we}) według wzoru (Sowa, Kulak 1999):

$$P_{we} = \frac{WE_{LT} - WE_P}{WE_P} \times 100\%$$

gdzie:

WE_{LT} – wydatek energetyczny określony metodą Lehmana lub zestawień tabelarycznych,

WE_P – wydatek energetyczny określony metodą pomiarową.

3. Wyniki badań

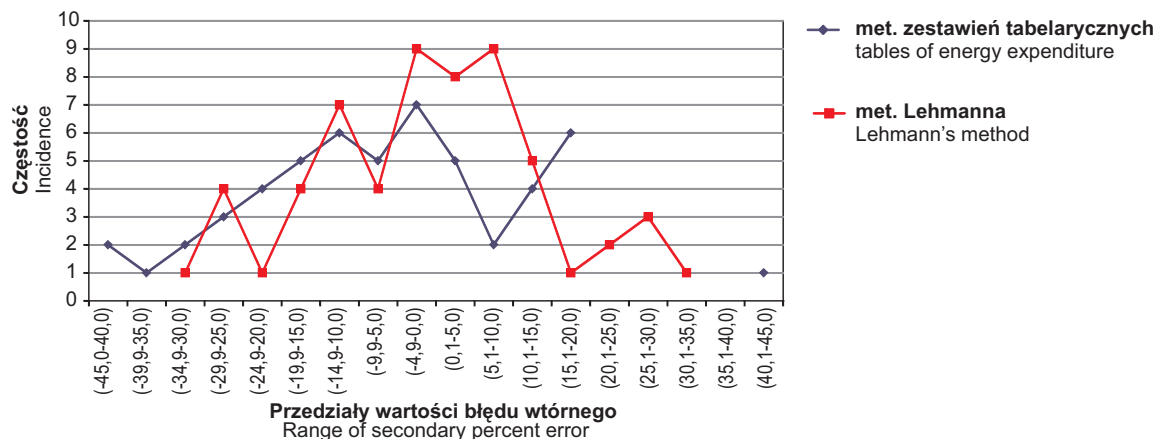
Błąd określenia wydatku energetycznego dla czynności roboczych

Wartość błędów procentowych wtórnych WE dla poszczególnych czynności, określonego metodą zestawień tabelarycznych wahała się w granicach od -44,47 do 42,31% (ryc. 1). Błąd oceny WE określonego za pomocą metody Lehmana charakteryzował się mniejszą zmiennością – od -31,35 do 34,13%. Różnice wartości średnich błędów wtórnych analizowanych metod różniły się istotnie ($p=0,048$).

Największą reprezentacją wartości błędów (52,8%) mieściła się w przedziale od -19,9 do 5,0%. Największe zagęszczenie wartości stwierdzono dla przedziału od -4,9 do 10,0%, który skupia 44,1% wyników (ryc. 1). Stosowanie zestawień tabelarycznych powodowało заниżanie wartości wydatku energii dla 64,1% czynności, a metody Lehmana dla 49,1%.

Błąd określenia wydatku energetycznego dla zmiany roboczej

Zestawienie wartości błędów wtórnych WE dnia pracy (8 h) na podstawie zestawień tabelarycznych i metody Lehmana przedstawia tabela 1. Wartości błędów wtórnych oszacowania WE zmiany roboczej dla metody zestawień tabelarycznych mieściły się w przedziale od -33,31 do 33,31%. Dla metody Lehmana przedział wartości był mniejszy i wynosił od -17,67 do 26,31%.



Rycina 1. Wykres funkcji gęstości rozkładu procentowego błędu wtórnego [%] dla zastosowanych metod określania wydatku energetycznego

Figure 1. Graph of density function of secondary percent error [%] for applied methods of energy expenditure estimation

Tabela 1. Błąd procentowy wtórny [%] wydatku energetycznego netto zmiany roboczej określonego zastosowanymi metodami

Table 1. Secondary percent error [%] of net energy expenditure on a work shift determined by applied methods

Stanowisko lub rodzaj pracy Workstation or kind of work		Metoda zestawień tabelarycznych Tables of energy expenditure [%]	Metoda Lehmana Lehmann's method [%]
Sadzenie pod kostur IBL Planting with standard dibble	kosturujący / planter	1,09	8,23
	pomocnik z sadzonkami / helper	-22,49	26,11
Sadzenie pod kostur Getynga (rowerkowy) Planting with Getynga dibble	kosturujący / planter	14,10	22,38
	pomocnik z sadzonkami / helper	-22,70	26,31
Sadzenie pod kostur Huffa Planting with Huffa dibble	kosturujący / planter	33,31	20,84
	pomocnik z sadzonkami / helper	-22,40	25,00
Ręczne wykonywanie talerzy Manual soil scarification		-8,02	4,44
Sadzenie pod szpadel Planting with spade	szpadlowy / planter	6,09	6,21
	pomocnik z sadzonkami / helper	-22,80	7,01
Ręczne wykaszanie uprawy Manual weeding with scythe		5,69	-1,40
Mechaniczne wykaszanie uprawy Motor-manual weeding		-	-7,15
Czyszczenie wczesne Early cleaning with machete		10,41	3,18
Grodzenie uprawy Enclosing forest plantation	pracownik / main worker	-	-3,19
	pomocnik / helper	-	-16,22
Zabezpieczanie pniaków preparatem PgIBL Treating stumps by PgIBL		-	-3,74
Wywieszanie budek lęgowych dla ptaków Hanging birds boxes		-	-7,46
Czyszczenie późne Late cleaning with chainsaw		4,20	0,99

Stanowisko lub rodzaj pracy Workstation or kind of work		Metoda zestawień tabelarycznych Tables of energy expenditure [%]	Metoda Lehmana Lehmann's method [%]
Trzebież wczesna / technologia ręczno-maszynowa Early thinning / motor-manual technology	drwal / feller	-10,65	-5,78
	pomocnik drwala feller's assistant	-14,00	-1,14
	zrywkarz (ciągnik C-330) / skidder-driver of farm tractor Ursus C-330	-27,55	5,61
Trzebież późna / technologia ręczno-maszynowa Late thinning / motor-manual technology	drwal / feller	-8,58	-3,21
	pomocnik drwala feller's assistant	-7,99	1,37
	zrywkarz (LKT-81) skidder-driver of LKT-81	-8,78	-7,03
	zrywkarz konny horse skidder (carter)	-28,68	-1,82
Trzebież późna / technologia maszynowa Late thinning / full-machine technology	operator harwestera harvester operator	5,13	4,54
	operator forwardera forwarder operator	-33,31	-17,67
Trzebież późna / technologia maszynowa z międzypolem Late thinning / full-machine technology with a mid-field	operator harwestera harvester operator	4,59	4,14
	operator forwardera forwarder operator	-32,03	-17,30
	drwal / feller	-2,02	2,07
	pomocnik drwala / feller's assistant	1,60	-4,91

Metoda zestawień tabelarycznych prowadziła do zaniżenia ($x=-7,43\%$; $p=0,014$) wartości WE zmiany roboczej, natomiast metoda Lehmana do nieznacznego zawyżenia ($x=2,35\%$; $p=0,014$). Metoda zestawień powodowała zaniżenie wielkości wydatku energetycznego dla 56,0%, natomiast metoda Lehmana dla 46,7% prac.

4. Dyskusja

Przeprowadzone badania wskazują, że szacowanie WE poszczególnych czynności roboczych może prowadzić do popełnienia procentowego błędu wtórnego w granicach od -44 do 42% w metodzie zestawień tabelarycznych i od -31 do 34% w przypadku metody Lehmana. Dla większości czynności metoda bazująca na zestawieniach tabelarycznych daje wyniki zaniżone, w granicach do -20%, natomiast metoda Lehmana w większości przypadków powoduje nieznaczące zaniżenie (do -5%) lub zwiększenie (do 10%) wartości WE w porównaniu z pomiarem wentylacji płuc. Stwierdzono częściowe znoszenie się różnic wydatku energii poszczególnych czynności i zmniejszenie wartości procentowego błędu wtórnego WE zmiany roboczej.

Tak znaczne różnice w poziomie WE uzyskanego metodą opartą na pomiarze wentylacji płuc i oszacowanego na podstawie zestawień tabelarycznych mogą wynikać z faktu, że literaturowe zestawienia wartości wydatku są niepełne i pochodzą z okresu kilkudziesięciu lat. Dla części czynności wykorzystano wielkości podawane dla czynności o podobnym charakterze, co może prowadzić do zwiększenia błędu. Dodatkowo, wartości spotykane w literaturze podawane są w sposób niejednorodny, jako wydatek energetyczny netto lub brutto (z przemianą podstawową), dla osób standardowych lub bez określenia parametrów wzrostu i masy ciała oraz bez podania informacji odnośnie tempa pracy i warunków mikroklimatycznych. Nie bez znaczenia jest również możliwość wystąpienia różnic, wynikających ze specyfiki pracy w różnych gałęziach przemysłu oraz ze zmian technologicznych, jakie zaistniały wskutek postępu technicznego (Koradecka, Bugajska 1998; Mako-wiec-Dąbrowska et al. 1994, 2000).

W przypadku stosowania metody Lehmana największym źródłem błędu może być nieprawidłowe zaklasyfikowanie grup mięśniowych zaangażowanych w wykonywanie czynności oraz błędne określenie stopnia intensywności wysiłku. Istotny wpływ na poziom

błędu ma również tempo pracy (Makowiec-Dąbrowska 1988; Makowiec-Dąbrowska et al. 2000).

Wykorzystywanie do określania *WE* podawanych w literaturze zestawień tabelarycznych powoduje jego заниżanie, zarówno dla poszczególnych czynności roboczych, jak i dla całego dnia pracy. Metoda Lehmana pozwala na zachowanie większej dokładności, co przemawia za jej wykorzystaniem w przypadku braku możliwości pomiaru zużycia energii. Metoda ta może być w dalszym ciągu wykorzystywana do oceny *WE* na stanowisku pracy w celu jego usprawnienia, oceny metabolizmu dla norm mikroklimatycznych czy weryfikacji zasad przyznawania posiłków regeneracyjnych. W odniesieniu do wykorzystania tej metody do określenia zasadności przyznawania posiłków regeneracyjnych należy pamiętać o możliwości popełnienia błędu w zakresie do 20%. Stąd w przypadkach wyników granicznych należy wykonać badanie obciążenia energetycznego metodą pomiarową.

5. Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań można sformułować następujące wnioski:

Metoda zestawień tabelarycznych *WE* powoduje заниżanie wyników wydatku energetycznego poszczególnych czynności roboczych.

Metoda Lehmana daje mniejszy poziom błędów przy określaniu *WE* na stanowisku pracy.

Stwierdzono częściowe znoszenie się różnic wydatku energii poszczególnych czynności i zmniejszenie wartości procentowego błędów wtórnego *WE* zmiany roboczej przy zastosowaniu obu metod szacowania obciążenia energetycznego.

Podziękowania

Badania zostały zrealizowane w ramach projektu badawczego zleconego przez Generalną Dyрекcję Lasów Państwowych pt. "Opracowanie charakterystyk prac leśnych w zakresie ich bezpieczeństwa, szkodliwości i uciążliwości".

Literatura

- Dębowski M.T., Spioch F.M. 1992. Chronometrażowo-tabelaryczna metoda oceny wydatku energetycznego. *Zastosowania Ergonomii*, 3: 67–77.
- Fibiger W. 1976. Ochrona zdrowia pracowników leśnictwa. Warszawa, Wydawnictwo Lekarskie PZWL, 178 s.

- Fibiger W., Rogoziński A. 1977. Koszt energetyczny pracy. Warszawa, Instytut Wydawniczy CRZZ, 103 s.
- Grzywiński W. 2007. Ergonomia i ochrona pracy w leśnictwie. Przewodnik do ćwiczeń. Poznań, Wyd. AR w Poznaniu, 128 s., ISBN 9788371604546.
- Jakubowski R. 1973. Leśnictwo, w: Charakterystyka higieniczna niektórych stanowisk pracy w rolnictwie i leśnictwie (red. W. Hołubut). Warszawa, Wydawnictwo Lekarskie PZWL, s. 149–169.
- Józefaciuk J., Nowacka W. 1993. Ćwiczenia z ergonomii i ochrony pracy. Warszawa, Wyd. SGGW, 68 s. ISBN 830002185X.
- Konarska M. 1985. Metody oceny wydatku energetycznego. *Bezpieczeństwo Pracy*, 6: 3–8.
- Koradecka D., Bugajska J. 1998. Ocena wielkości obciążenia pracą fizyczną na stanowiskach roboczych. Warszawa, Centralny Instytut Ochrony Pracy, 143 s. ISBN 838735421X.
- Koradecka D., Sawicka A. 1987. Ocena obciążenia organizmu pracą fizyczną. *Bezpieczeństwo Pracy*, 11: 9–14.
- Kozłowski S., Nazar K. 1999. Wprowadzenie do fizjologii klinicznej. Wyd. III. Warszawa, Wydawnictwo Lekarskie PZWL, 650 s., ISBN 83-200-2328-9.
- Lehmann G. 1966. Praktyczna fizjologia pracy. Warszawa, Wydawnictwo Lekarskie PZWL, 390 s.
- Makowiec-Dąbrowska T. 1988. Zasady oceny obciążenia fizycznego podczas pracy zawodowej. *Zeszyty Metodyczno-Organizacyjne*, 22: 15–53.
- Makowiec-Dąbrowska T., Iżycki J., Radwan-Włodarczyk Z., Koszada-Włodarczyk W. 1994. Poradnik metodyczny oceny obciążenia fizycznego oraz stosowania przerw w pracy. Warszawa, Ministerstwo Pracy i Polityki Społecznej, 71 s.
- Makowiec-Dąbrowska T., Radwan-Włodarczyk Z., Koszada-Włodarczyk W., Józwiak Z.W. 2000. Obciążenie fizyczne – praktyczne zastosowanie różnych metod oceny. Łódź, Instytut Medycyny Pracy, 70 s. ISBN 8388261029.
- Pałka M. 1990. Metabolizm człowieka podczas pracy (proponycja standaryzacji badań). *Bezpieczeństwo Pracy*, 11: 3–6.
- PN-EN ISO 8996: 2005. Ergonomia – Oznaczanie metabolicznej produkcji ciepła. Warszawa, PKN.
- Rogoziński A. 1988. Prosta metoda oceny wydatku energetycznego. *Bezpieczeństwo Pracy*, 11–12: 9–13.
- Sowa J.M., Kulak D. 1999. Analiza wydatku energetycznego pilarza przy wykonywaniu czynności obróbczych związanych ze ścinką i wyróbką drzew, w: Tendencje i problemy mechanizacji prac leśnych w warunkach leśnictwa wielofunkcyjnego. Materiały Symposium Naukowego (red. H. Różański), Poznań 23–24 czerwca 1999. Katedra Mechanizacji Leśnictwa AR, Poznań, s. 165–172.

Wkład autorów

W.G. – pomysł podjęcia prezentowanych badań, przegląd literatury, prowadzenie i analiza danych oraz opieka merytoryczna nad całością tekstu. P.M.S. – prowadzenie badań, zbieranie danych. M.B. – prowadzenie badań, zbieranie danych.

Comparing methods of energy expenditure estimation using forestry as an example

Witold Grzywiński*, Piotr S. Mederski, Mariusz Bemberek

Poznań University of Life Sciences, Department of Forest Utilisation
ul. Wojska Polskiego 71A, 60–625 Poznań, Poland

*Tel. +48 61 848 75 88, fax +48 61 848 77 55; e-mail: witold.grzywinski@up.poznan.pl

Abstract. In this paper the values of energy expenditure obtained with estimative methods (tables of energy expenditure, Lehmann's method) were compared to the data obtained with a method based on pulmonary ventilation measurements. Thereby, the usefulness of estimative methods for determining energy expenditure on work stations in forestry was tested.

We compared energy expenditures for 30 forestry workstations within which 59 different activities were distinguished. For each activity the energy expenditure was determined utilizing the three following methods: pulmonary ventilation measurement, tables of energy expenditure and Lehmann's method.

The percentage error in energy expenditure for particular activities determined with tables ranged from -44.47% to 42.31%. The highest representation of error value (52.8%) varied between -19.9% and 5.0%. The error in energy expenditure estimation determined with Lehmann's method is characterised by a smaller variability ranging from -31.35% to 34.13%. The highest density of error values was found in the range from -4.9% to 10.0%, which comprises 44.1% of the results. To conclude, the use of tables resulted in an underestimation of the energy expenditure value for 64.1% of activities, whereas the use of Lehmann's method resulted in an underestimation in 49.1% of the cases.

Key words: energy expenditure, comparison of methods, forestry

1. Introduction

The energy expenditure (EE) of work is a value used to assess physical workload. The gasometric method (indirect calorimetry), based on the volume of oxygen consumption, is commonly used for this purpose. It is a reliable method; however, it requires the use of specialised measuring instruments. A simplified version of the calorimetric method is often used in industry to measure EE, namely by measuring lung ventilation – the volume of air inhaled or exhaled (Koradecka, Bugajska 1998).

In situations where taking measurements is not possible, estimation methods, such as EE tables and Lehmann's method, can be applied to determine EE. In both methods, a time study of the work day needs to be taken to

determine the proportion of individual work activities to estimate the energy load of a work shift.

The tabular method uses research results on EE values from the literature published thus far. Sets of EE in forestry are found in the work of Jakubowski (1973), Fibiger (1976), Fibiger and Rogoziński (1977), Józefaciuk and Nowacka (1993) and Grzywiński (2007), among others. When using tables, one must remember that significant differences may arise due to, among others, technological advances, work pace, the size of transported loads, work organisation, site and weather conditions, etc.

The unit of EE for specific activities is determined in two stages with Lehmann's method. The first stage is an assessment of the body's position during work. The EE for maintaining that position is determined from tables.

The second stage is an assessment of the main muscle groups involved in performing work activities and the intensity of the effort. Then, using another table, the EE associated with performing a given activity is determined. The net energy cost of the work is the sum of the results obtained from both stages (Lehmann 1966). It should be remembered that the tables relate to the energy costs of working men. For women, the table value should be multiplied by a factor of 0.80–0.85. A modified Lehmann's method is used to determine the metabolic rate associated with body position, type of work and movement of the body, related to the intensity of the work performed (PN-EN ISO 8996:2005).

According to various authors, the use of estimation methods allows the EE to be specified with an accuracy of approximately 10–20% (Konarska 1985; Koradecka, Sawicka 1987; Rogoziński, 1988; Pałka 1990; Dębowski, Spioch 1992). In their analysis of several activities related to timber harvesting, Sowa and Kulak (1999) found large error values when calculating estimated EEs, reaching almost 74%. According to the authors, much larger errors are incurred using the tabular method than Lehmann's method, resulting in an overestimation of EE for specific activities and significantly changing the picture obtained of a daily workload by aggregating the EE values for subsequent activities performed at the workstation.

The aim of this study was to compare simple methods to estimate EE with data obtained from pulmonary ventilation measurements and to assess the usefulness of estimation methods to determine the energy load for workstations in forestry.

2. Study methods

Comparisons of EE amounts were performed for 30 types of forestry work representing the basic tasks of forest management (silviculture, conservation and utilisation). Fifty-nine activities were distinguished in the analysed tasks, for which the EE value was determined by three methods: measurement – pulmonary ventilation measurements (using the MWE-1 EE meter), sets of tables, and Lehmann's method.

When analysing the results, the baseline EE value was the measurement obtained from pulmonary ventilation results using the MWE-1 EE meter. This measure is based on the existence of an almost linear relationship between the amount of oxygen consumed during exercise and the magnitude of lung ventilation in 1 min (Kozłowski, Nazar 1999). The measurement of pulmo-

nary ventilation and EE was carried out according to the methodology recommended in the literature (Koradecka, Bugajska 1998; Makowiec-Dąbrowska et al., 2000).

The secondary percent error (P_{we}) was calculated for the EE amount obtained from Lehmann's method and the sets of tables according to the formula (Sowa, Kulak 1999):

$$P_{we} = \frac{WE_{LT} - WE_p}{WE_p} \times 100\%$$

where WE_{LT} is the EE determined by using Lehmann's method or the set of tables, and WE_p the EE determined by direct measurement methods.

3. Study results

Error in determining the EE of work activities

The secondary percent error when using the tables to determine the EE for individual activities ranged from -44.47% to 42.31% (Fig. 1). The error assessment of EE values obtained with Lehmann's method was less variable – from -31.35% to 34.13%. The difference in the mean percent error values of the analysed methods differed significantly ($p = 0.048$).

The largest representation of the error value (52.8%) was in the range of -19.9% to 5.0%. The highest density of values was found for the range of -4.9% to 10.0%, which represents 44.1% of the results (Fig. 1). The use of tabular sets resulted in lowered values of EE for 64.1% of the work activities, whereas with Lehmann's method, for 49.1% of activities.

Error in determining the energy expenditure of a work shift

Table 1 presents the EE secondary percent error values for a work day (8 h) obtained using the tabular and Lehmann's methods. The secondary percent error values of EE estimates for a work shift using the sets of tables ranged from -33.31% to 33.31%. The range of values for Lehmann's method was smaller, from -17.67% to 26.31%. The tabular method led to underestimating ($x = -7.43\%$) the EE values of a shift ($p = 0.014$), while Lehmann's method resulted in a slight overestimate ($x = 2.35\%$). The tabular method resulted in underestimating the amount of EE for 56.0% of the work activities and for 46.7% of the activities with Lehmann's method.

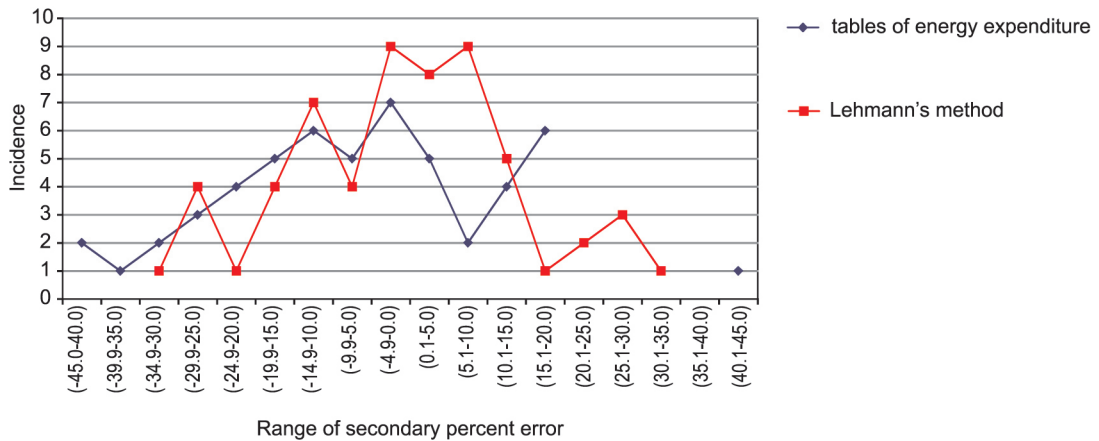


Figure 1. Graph of the density function of the secondary percent error (%) for the applied methods of estimating EE.

Table 1. Secondary percent error [%] of net energy expenditure for a work shift determined by the applied methods

Workstation or type of work	Energy expenditure tables (%)	Lehmann's method (%)
Planting with a standard dibble:		
Planter	1.09	8.23
Helper	-22.49	26.11
Planting with a Getinga dibble:		
Planter	14.10	22.38
Helper	-22.70	26.31
Planting with a Huffa dibble:		
Planter	33.31	20.84
Helper	-22.40	25.00
Manual soil scarification	-8.02	4.44
Planting with a spade:		
Planter	6.09	6.21
Helper	-22.80	7.01
Manual weeding with a scythe	5.69	-1.40
Motor-manual weeding	-	-7.15
Early cleaning with a machete	10.41	3.18
Enclosing a forest plantation:		
Main worker	-	-3.19
Helper	-	-16.22
Treating stumps with PgIBL	-	-3.74
Hanging bird boxes	-	-7.46
Late cleaning with a chainsaw	4.20	0.99
Early thinning / motor-manual technology:		
Feller	-10.65	-5.78
Feller's assistant	-14.00	-1.14
Skidder-driver of an Ursus C-330 agricultural tractor	-27.55	5.61

Workstation or type of work	Energy expenditure tables (%)	Lehmann's method (%)
Late thinning / motor-manual technology:		
Feller	-8.58	-3.21
Feller's assistant	-7.99	1.37
LKT-81 skidder-driver	-8.78	-7.03
Horse-drawn skidder (carter)	-28.68	-1.82
Late thinning / full-machine technology:		
Harvester operator	5.13	4.54
Forwarder operator	-33.31	-17.67
Late thinning / full-machine technology with a mid-field:		
Harvester operator	4.59	4.14
Forwarder operator	-32.03	-17.30
Feller	-2.02	2.07
Feller's assistant	1.60	-4.91

4. Discussion

The study indicates that estimating the EE of individual work activities may result in secondary percent errors in the range of -44% to 42% when using tables and from -31% to 34% with Lehmann's method. For most of the work activities, using tables, resulted in underestimates of about -20%, while Lehmann's method caused a slight underestimation (up to -5%) in most cases or an increase (to 10%) of EE values compared with pulmonary ventilation measurements. It was found that differences in the EE of specific activities were partially eliminated and the secondary percent error value of EE for work shifts was reduced.

Such significant differences in the EE level between values obtained from pulmonary ventilation measurements and those estimated from the tables may be due to incomplete information on expenditures in the literature and because they originate from a period of several decades. The EE value was estimated for some activities from data for similar, but not identical, activities, which may have led to larger errors. In addition, the values provided in the literature are not uniform – they are presented as net or gross EE (with basal metabolic rate), for standardised persons, lacking parameters for height, weight or body mass, with no information about the pace of work and the microclimatic conditions. Differences may also arise from the specific nature of the work in various branches of industry and the technological changes that have occurred (Koradecka, Bugajska, 1998; Makowiec-Dąbrowska et al., 1994, 2000).

In the case of Lehmann's method, the greatest source of error may be the incorrect classification of the mus-

cle groups involved in performing the activities and an erroneous determination of the intensity of the effort. The error rate may also be significantly impacted by the pace of the work (Makowiec-Dąbrowska, 1988; Makowiec-Dąbrowska et al., 2000).

Using sets of tables from the literature to determine EE levels results in an underestimate of both individual work activities, as well as of an entire working day. Lehmann's method provides greater accuracy, which would favour its use when EE measurements cannot be taken. This method can still be used to assess EE in the workplace to make improvements, assess metabolism to determine microclimatic norms or verify the guidelines for providing high-energy meals. In terms of its use to determine whether high energy meals are needed, the possibility of error at a level of 20% should be remembered. For this reason, the energy load should be measured directly when borderline results are obtained.

5. Conclusions

The following conclusions can be drawn based on the study performed:

The method of using sets of EE tables underestimates the results of EE required for individual work activities.

Using Lehmann's method results in a lower level of error in determining the EE for a workstation.

We found that the differences in EE for specific work activities were partially eliminated and the secondary percent error for the EE of a work shift was reduced when both estimating methods were used.

Acknowledgements

This study was conducted as part of a research project commissioned by the General Directorate of State Forests entitled 'Development of the characteristics of forestry work in terms of its safety, hazards and workload'.

References

- Dębowski M.T., Spioch F.M. 1992. Chronometrażowo-tabelaryczna metoda oceny wydatku energetycznego. *Zastosowania Ergonomii*, 3: 67–77.
- Fibiger W. 1976. Ochrona zdrowia pracowników leśnictwa. Warszawa: Wydawnictwo Lekarskie PZWL.
- Fibiger W., Rogoziński A. 1977. Koszt energetyczny pracy. Warszawa, Instytut Wydawniczy CRZZ.
- Grzywiński W. 2007. Ergonomia i ochrona pracy w leśnictwie. Przewodnik do ćwiczeń. Poznań: Wyd. AR.
- Jakubowski R. 1973. Leśnictwo, in: Charakterystyka higieniczna niektórych stanowisk pracy w rolnictwie i leśnictwie (W. Hołobut, ed). Warszawa: Wydawnictwo Lekarskie PZWL, pp. 149–169.
- Józefaciuk J., Nowacka W. 1993. Ćwiczenia z ergonomii i ochrony pracy. Warszawa: Wyd. SGGW.
- Konarska M. 1985. Metody oceny wydatku energetycznego. *Bezpieczeństwo Pracy*, 6: 3–8.
- Koradecka D., Bugajska J. 1998. Ocena wielkości obciążenia pracą fizyczną na stanowiskach roboczych. Warszawa: Centralny Instytut Ochrony Pracy.
- Koradecka D., Sawicka A. 1987. Ocena obciążenia organizmu pracą fizyczną. *Bezpieczeństwo Pracy*, 11: 9–14.
- Kozłowski S., Nazar K. 1999. Wprowadzenie do fizjologii klinicznej. III Edition. Warszawa: Wydawnictwo Lekarskie PZWL.
- Lehmann G. 1966. Praktyczna fizjologia pracy. Warszawa: Wydawnictwo Lekarskie PZWL.
- Makowiec-Dąbrowska T. 1988. Zasady oceny obciążenia fizycznego podczas pracy zawodowej. *Zeszyty Metodyczno-Organizacyjne*, 22: 15–53.
- Makowiec-Dąbrowska T., Iżycki J., Radwan-Włodarczyk Z., Koszda-Włodarczyk W. 1994. Poradnik metodyczny oceny obciążenia fizycznego oraz stosowania przerw w pracy. Warszawa: Ministry of Labour and Social Policy.
- Makowiec-Dąbrowska T., Radwan-Włodarczyk Z., Koszda-Włodarczyk W., Józwiak Z. W. 2000. Obciążenie fizyczne – praktyczne zastosowanie różnych metod oceny. Łódź, Instytut Medycyny Pracy.
- Pałka M. 1990. Metabolizm człowieka podczas pracy (propozycja standaryzacji badań). *Bezpieczeństwo Pracy*, 11: 3–6.
- PN-EN ISO 8996: 2005. Ergonomia – Oznaczanie metabolicznej produkcji ciepła. Warszawa: PKN.
- Rogoziński A. 1988. Prosta metoda oceny wydatku energetycznego. *Bezpieczeństwo Pracy*, 11–12: 9–13.
- Sowa J.M., Kulak D. 1999. Analiza wydatku energetycznego pilarza przy wykonywaniu czynności obróbczych związanych ze ścinką i wyróbką drzew, in: Tendencje i problemy mechanizacji prac leśnych w warunkach leśnictwa wielofunkcyjnego. Materials from the Scientific Symposium (H. Różański, ed.), Poznań, 23–24 czerwca 1999. Poznań: Katedra Mechanizacji Leśnictwa AR, pp. 165–172.

Author's contribution

W.G. gave research idea, literature review, data collection and analysis, supervision of manuscript preparation. P.M.S. performed the study and data collection. M.B. performed the study and data collection.