انرژی خوراک و تقسیم بندی آن در بدن

مواد مغذی آلی به عنوان مواد لازم برای سنتز بافت‌های بدن و فرآورده‌هایی نظیر شیر، تخم مرغ و همچنین به عنوان منابع انرژی برای کارهایی که دام انجام می‌دهد مورد نیاز حیوان هستند. وجه مشترکی که در تمامی این وظائف به چشم می‌خورد درگیر بودن آنها در امر انتقال انرژی است. انتقال انرژی علاوه بر این‌که تبدیل انرژی شیمیائی با انرژی حرارتی یا مکانیکی مانند اکسیداسیون مواد مغذی را در بردارد شامل تبدیل صور مختلف انرژی شیمیایی نظیر سنتز چربی بدن از کربوهیدرات‌ها نیز است. بنابراین قابلیت غذا در تأمین انرژی، اهمیت فراوان در تعیین ارزش تغذیه‌ای غذا خواهد داشت.

انرژی مورد نیاز

حیوانی که از غذا محروم مانده به منظور ادامه اعمال حیاتی خود به عبارت دیگر برای حرکات مکانیکی در فعالیت ضروری ماهیچه‌ها، برای کارهای شیمیایی مانند حرکت مواد محلول در خلاف جهت غلظت و همچنین برای سنتز موادی نظیر آنزیم‌ها و هورمون‌ها که دائماً در بدن مصرف می-شوند به انرژی احتیاج دارد. حیوانی که گرسنگی می‌کشد انرژی مورد نیاز مقاصد فوق الذکر را از کاتابولیسم ذخائر بدن، ابتدا از گلیکوژن سپس از چربی و در مرحله آخر از پروتئین تأمین می-نماید. تأمین انرژی مورد نیاز بقاء (نگهداری بدن) و لذا جلوگیری از کاتابولیسم بافت‌های بدن برای حیوانی که غذا در اختیار دارد در درجه اول اهمیت قرار می‌گیرد.

هنگامی که تمام انرژی شیمیایی غذا به مصرف کارهای مکانیکی و شیمیایی لازم برای بقای حیوان رسیده و در حقیقت حیوان کاری در محیط اطراف خود انجام نمی‌دهد انرژی مصرف شده تبدیل به حرارت می‌گردد. انرژی حرارتی بوجود آمده تنها از نظر ابقای درجه حرارت بدن برای حیوان مفید است.

مقدار حرارتی که در بدن یک حیوان محروم از غذا تولید می‌شود برابر مقدار انرژی بافت‌هائی است که مورد کاتابولیسم قرار می‌گیرند و هنگامی که تحت شرایط بخصوصی اندازه گیری شود به آن «متابولیسم پایه» حیوان اطلاق می‌گردد.

آن مقدار از انرژی غذا که مازاد بر احتیاجات بقای حیوان است به مصرف تولید محصولات گوناگون می‌رسد. (صحیح‌تر آن است که گفته شود مواد مغذی مازاد بر احتیاجات بقای حیوان به مصرف تولید محصولات گوناگون می‌رسند). حیوان جوان و در حال رشد انرژی را عمدتاً به صورت پروتئین در بافت‌های جدید ذخیره می‌کند در حالی‌که حیوان بالغ انرژی را به صورت چربی و حیوان شیروار آن را به اجزاء تشکیل دهنده شیر که خود حاوی انرژی هستند منتقل می نماید. از صور دیگر تولید، کار ماهیچه‌ها و تولید پشم و تخم مرغ را می توان نام برد.

هیچ وظیفه یا عملی در بدن حتی بقاء، در اختصاص دادن انرژی غذا به خود ارجح مطلق نیست به این ترتیب که اگر حیوان جوان مقادیر کافی پروتئین دریافت کند و معهذا انرژی کافی برای بقا در اختیار نداشته باشد در ضمن ذخیره پروتئین، از ذخیره چربی بدن خود برای تأمین انرژی مورد نیاز استفاده خواهد نمود. به هیمن ترتیب رشد پشم در حیوانی که مقدار انرژی غذای آن کمتر از مقدار لازم برای بقا است و یا حتی در حیوان محروم از غذا ادامه می‌یابد.

انرژی خام غذاها Gross energy (GE)

حیوان انرژی خود را از غذا تأمین می‌کند. مقدار انرژی شیمیایی غذا با تبدیل آن به انرژی حرارتی اندازه گیری می‌شود. این تبدیل با سوزاندن غذا صورت گرفته و به مقدار حرارتی که از اکسیداسیون کامل واحد وزن غذا به دست می‌آید «انرژی خام» یا «حرارت احتراق» غذا اطلاق می‌گردد.

برای اندازه گیری انرژی خام از وسیله ای به نام «بمب کالری متر» استفاده می‌شود. ساده ترین نوع این دستگاه از یک اتاقک فلزی محکم (بمب) که در داخل مخزن عایق حاوی آب قرار می گیرد تشکیل شده است. نمونه غذا در داخل بمب جای می‌گیرد و سپس به داخل آن اکسیژن فشرده وارد نموده و بعد از اندازه گیری حرارت آب اطراف بمب، توسط جریان برق محتویات آن را می‌سوزانند.

حرارت حاصل از اکسیداسیون توسط بمب و آب جذب می‌گردد. پس از برقراری تعادل، حرارت آب دوباره اندازه گیری می‌شود. مقدار حرارت تولید شده با استفاده از اختلاف درجات حرارت قبل و بعد از سوزاندن و همچنین وزن و درجه حرارت ویژه آب و بمب تعیین می‌گردد.

به وسیله بمب کالری متر می توان انرژی خام غذا یا اجزاء آن، بافت های حیوانی و انواع مواد دفعی را اندازه گیری نمود. درجه اکسیداسیون، فاکتور اصلی تعیین کننده میزان انرژی خام یک ماده آلی است که بر حسب نسبت مجموع کربن و هیدروژن و به اکسیژن بیان می‌شود. این نسبت در کلیه کربوهیدرات‌ها مشابه بوده و بنابراین انرژی خام آنها تا حدودی یکسان است (۱۷٫۵ مگاژول در کیلوگرم ماده خشک). اکسیژن نسبتاً در چربی‌ها کمتر است. بنابراین انرژی خام هر یک از اسیدهای چرب با توجه به طول زنجیر کربن آن‌ها متغیر است بنابراین اسیدهای چرب زنجیر کوتاه (اسیدهای چرب فرار) انرژی خام کمتری دارند.

میزان انرژی خام پروتئین‌ها از کربوهیدرات ها بیشتر است چرا که علاوه بر کربن، هیدروژن و اکسیژن، عناصر قابل اکسیداسیون دیگری همانند ازت (و همچنین گوگرد) در ساختمان آنها وجود دارد. متان به خاطر این‌که تنها از کربن و هیدروژن تشکیل شده است از میزان انرژی بیشتری برخوردار است.

علی رغم این تفاوت‌ها چون جزء کربوهیدرات غذاها معمولاً از نظر مقدار غالب است تفاوت بین غذاهای مختلف دام از نظر انرژی خام زیاد نیست. تنها غذاهای غنی از چربی (مانند کنجاله بذر کتان که حاوی ۹٪ چربی خام است) از نظر تولید انرژی بالاتر و خوراک‌های سرشار از خاکستر (که فاقد ارزش حرارتی است) خیلی پائین‌تر از میانگین هستند، اکثر غذاهای معمولی دارای ۱۸٫۵ مگاژول به ازای هر کیلوگرم ماده خشک خود هستند. تمام انرژی خام موجود در غذاها برای حیوان قابل استفاده و مفید نیست. مقداری از این به شکل جامد، مایع و گاز از بدن حیوان دفع و بخش دیگری به شکل حرارت تلف شده و از دسترس حیوان خارج می‌گردد.

انرژی قابل هضم Digestible energy (DE)

انرژی قابل هضم ظاهری یک غذا عبارت است از: میزان انرژی خام واحد وزن غذا منهای انرژی خام مدفوع حاصل از مصرف هر واحد وزن آن غذا.

انرژی قابل متابولیسم Metabolizable energy (ME)

علاوه بر اتلاف انرژی از طریق مدفوع، حیوان متحمل اتلاف انرژی بیشتری از راه دفع مواد حاوی انرژی ادرار و خروج گازهای قابل احتراق از دستگاه گوارش به ویژه در حیوانات نشخوارکننده، می-گردد. مقدار انرژی قابل متابولیسم یک غذا از تفاضل مجموع مقادیر انرژی تلف شده در ادرار و

گازهای قابل احتراق از «انرژی قابل هضم» بدست می‌آید. انرژی ادرار در ترکیبات ازته آن مانند اوره، اسید هیپوریک، کراتینین و آلانتیون و همچنین در ترکیبات غیر ازته‌ای نظیر اسید سیتریک استقرار یافته است.

تقریباً تمام گازی که از شکمبه خارج می‌شود از متان تشکیل شده و در ضمن تولید این گاز بستگی نزدیک به مقدار مصرف غذا دارد. اگر مقدار غذا تنها تکافوی بقای حیوان را نماید در حدود ۷ تا ۹ درصد انرژی خام (تقریباً ۱۱ تا ۱۳٪ انرژی قابل هضم) تلف می‌گردد ولی اگر مقدار غذا بیشتر شود اتلاف انرژی کاهش پیدا کرده و به ۶ تا ۷٪ انرژی خام از طریق خروج متان خواهد رسید. این کاهش در مورد غذاهای با قابلیت هضم زیاد مشهودتر است. در مواد غذائی همانند تفاله مالت غلات که از پیش تخمیر می‌شوند تولید متان پائین است (۳ درصد انرژی خام).

روش تعیین انرژی قابل متابولیسم یک نمونه غذایی مشابه آزمایش تعیین قابلیت هضم است با این تفاوت که جهت اندازه گیری انرژی قابل متابولیسم، ادرار و متان حاصله نیز همانند مدفوعات جمع آوری می‌گردند. در قفس‌های متابولیسم مخصوص خوک و گوسفند وسیله‌ای برای جمع آوری ادرار تعبیه گردیده است. ادرار گاو در کیسه‌های لاستیکی که به زیر شکم حیوان نر و یا به آلت تناسلی حیوان ماده متصل است جمع آوری شده و به وسیله مکش یا استفاده از نیروی ثقل به داخل مخزنی می‌ریزد.

استفاده از سوند مثانه روش دیگری برای جمع آوری ادرار در حیوانات ماده است که عموماً در خوک بکار می‌رود. در هنگام اندازه‌گیری متان، حیوان معمولاً در اطاقکی مخصوص و بدون منفذ بنام اتاق تنفسی قرار می‌گیرد.هنگامی‌که اتاق تنفسی در دسترس نباشد می‌توان انرژی متان را معادل ۸٪ انرژی خام مصرف شده منظور داشت.

به علاوه برای بدست آوردن تخمینی از مقدار انرژی قابل متابولیسم غذای نشخوارکنندگان می-توان مقدار انرژی قابل هضم آن را در ۰٫۸ ضرب نمود، از این مطلب نتیجه می شود که تقریباً ۲۰٪ انرژی قابل هضم ظاهری به صورت متان و ادرار دفع می‌گردد.

در طیور، تعیین انرژی قابل متابولیسم نسبت به انرژی قابل هضم آسان‌تر است، چرا که ادرار و مدفوع با همدیگر دفع می‌شوند. روش سریع و استانداردی برای تعیین انرژی قابل متابولیسم غذاهای طیور توسط سیبالد ابداع شده است. در این روش گروهی از خروس‌ها تا تخلیه دستگاه گوارش گرسنه باقی مانده (یا تنها مقدار اندکی گلوکز خورانده می‌شود) و پس از آن غذای مورد مطالعه به یکباره تغذیه اجباری می‌گردد.

فضولات تا زمان دفع کلیه بقایای حاصل از غذای مصرف شده جمع آوری می‌شود. در همین زمان به منظور اندازه گیری دفع انرژی از منشاء بافتی مقادیری از فضولات پرندگان گرسنه (یا تغذیه شده با گلوکز) جمع آوری می‌گردد. با کسر میزان اتلاف انرژی با منشاء بافتی از انرژی فضولات پرندگان تغذیه شده با غذای تحت مطالعه، انرژی قابل متابولیسم تخمینی به عوض ظاهری، حقیقی خواهد بود، که تحت عنوان انرژی قابل متابولیسم حقیقی (True Metabolizable energy) شناخته می‌شود و مستقیماً با مقادیر انرژی قابل متابولیسم اندازه گیری شده با روش-های دیگر قابل مقایسه نیست.

عوامل مؤثر در مقدار انرژی قابل متابولیسم غذاها

روشن است که اتلاف انرژی از طریق مدفوع مهم‌ترین صورت اتلاف آن از میان صور ذکر شده است. حتی در مورد غذاهایی که قابلیت هضم آن‌ها زیاد است، نظیر جو، انرژی دفع شده از طریق

مدفوع دو برابر مجموع مقادیر انرژی ادرار و متان می‌گردد. بنابراین عوامل عمده‌ای که در قابلیت هضم غذا تأثیر دارند در مقدار انرژی قابل متابولیسم غذا نیز تأثیر می‌گذارند.

مقدار انرژی قابل متابولیسم یک غذا با توجه به نوع حیوان مصرف کننده آن یا به طور اختصاصی تری با توجه به نوع دستگاه گوارش که غذا را هضم و جذب می‌کند متغیر است.

هضم توأم با تخمیر مواد غذایی در شکمبه و بخش‌های پائین‌تر دستگاه گوارش سبب اتلاف انرژی بصورت متان می‌شود.

افزایش اتلاف انرژی از ادرار (از تجزیه محصولات حاصل از هضم و جذب اسیدهای نوکلئیک باکتریائی حاصل می‌شود) و مدفوع (از تکثیر میکروارگانیسم‌ها در انتهای دستگاه گوارش که هضم نمی‌شوند)، حداقل تأثیر مداخله میکروارگانیسم‌ها در هضم مواد غذائی است. بنابراین در غذاهائی نظیر کنسانتره‌ها که به یک اندازه در نشخوارکنندگان و غیر نشخوار کنندگان هضم می‌شوند میزان انرژی قابل متابولیسم در غیر نشخوارکنندگان بیشتر است.

روش تهیه غذا در بعضی از موارد ممکن است در مقدار انرژی قابل متابولیسم آن مؤثر باشد. در نشخوارکنندگان، آرد کردن و سپس پلت نمودن مواد خشبی ممکن است منجر به افزایش اتلاف انرژی از طریق مدفوع گردد و از جهتی نیز با کاهش مقدار متان، قسمتی از این اتلاف جبران می-شود. آرد نمودن بذور غلات برای طیور اثر ثابتی در مقدار انرژی قابل متابولیسم آن‌ها نمی‌گذارد. افزایش مقدار مصرف غذا در نشخوارکنندگان ممکن است باعث کاهش قابل توجهی در قابلیت هضم غذا و در نتیجه کاهش مقدار انرژی قابل متابولیسم آن شود. به هر حال افزایش اتلاف انرژی از طریق مدفوع با کاهش اتلاف انرژی آن در متان و ادرار اندکی جبران می‌گردد. با وجود این، در مواد خشبی آسیاب شده و جیره‌های غذایی متشکل از مخلوط مواد خشبی و متراکم، با افزایش سطح تغذیه از مقدار انرژی قابل متابولیسم کاسته می‌شود.

اتلاف حرارتی غذاها (Heat increment)

صرف غذا توسط حیوان، اتلاف انرژی نه تنها به صورت دفع انرژی شیمیایی مواد جامد، مایع و گازی شکل بلکه به صورت حرارت را نیز به دنبال خواهد داشت. حیوانات به طور مداوم حرارت تولید نموده و آن را یا مستقیماً به وسیله تشعشع، هدایت و انتقال و به طور غیر مستقیم از طریق تبخیر آب از بدن خارج می‌کنند. اگر به حیوانی محروم از خوراک، غذا داده شود پس از چند ساعت تولید حرارت آن به بیش از سطح تولید حرارت در متابولیسم پس از مصرف یک وعده غذای زیاد رسیده و این امر کاملاً مشهود است.

اتلاف حرارتی غذا را می توان به صورت مطلق (کیلوژول در کیلوگرم ماده خشک غذا) و یا نسبی (به صورت نسبتی از انرژی خام یا قابل متابولیسم) بیان داشت. تا زمانی‌که حیوان در سرمای غیر عادی قرار نگیرد حرارت تولید شده مازاد بر احتیاج بوده و ارزشی ندارد و مانند اتلاف انرژی از طریق مدفوع و ادرار مالیاتی است که بر انرژی غذا تحمیل می‌گردد.

علل اتلاف حرارتی را می‌توان در فرآیندهای هضم غذاها و متابولیسم مواد مغذی حاصل ازآن‌ها یافت. عمل خوردن که شامل جویدن، بلع و ترشح بزاق است مستلزم فعالیت ماهیچه‌ای است که انرزی مورد نیاز آن از اکسیداسیون مواد مغذی حاصل می‌شود. در نشخوارکنندگان ۶ – ۳ درصد انرژی قابل متابولیسم مصرفی برای خوردن غذا، مربوط به جویدن مواد الیافی است.

همچنین در نشخوارکنندگان، فعالیت و متابولیسم میکروارگانیسم‌ها منجر به تولید حرارت می-گردد که مقدار آن در حدود ۸ – ۷ درصد انرژی قابل متابولیسم مصرفی برآورد می‌شود (یا به عبارت دیگر معادل ۰,۶ کیلوژول به ازای هر کیلو ژول متان تولیدی است).

« انرژی ویژه » و ابقای انرژی (Net energy)

با تفاضل مقدار انرژی حرراتی تلف شده از انرژی قابل متابولیسم، انرژی ویژه غذا بدست می‌آید. انرژی ویژه به آن قسمت از انرژی غذا اطلاق می‌شود که به مصرف واقعی حیوان، یا به عبارت دیگر بقا و اشکال مختلف تولید، می‌رسد. انرژی ویژه‌ای که اختصاص به بقای حیوان پیدا می‌کند عمدتاً به مصرف کارهای داخلی بدن رسیده و به صورت حرارت، بدن را ترک می‌کند.

آن قسمت از انرژی ویژه که به مصارف رشد، پروار شدن و تولید شیر، پشم و تخم مرغ می‌رسد به صورت شیمیایی در بدن ذخیره و یا خارج می‌گردد. به مقدار انرژی ای که صرف رشد و تولید شده انرژی ابقا شده حیوان اطلاق می‌شود.

درک این مطلب مهم است که تنها اتلاف واقعی انرژی در حیوان همان اتلاف حرارتی غذا است که می‌توان آن را مالیاتی مستقیم بر انرژی غذا دانست. مقدار حرارت تولید شده از مصرف انرژی برای بقا، نمایانگر مقداری از انرژی است که به هر حال توسط حیوان مورد استفاده قرار گرفته و در مراحل مصرف به صورت غیر مفید درآمده است.

روش های اندازه‌گیری مقدار ابقای انرژی

چون در آزمایشات کالری‌متری وسائل مورد نیاز بسیار دقیق و گران قیمت هستند و همچنین آزمایش تنها روی معدودی دام انجام می‌گیرد لذا کوشش‌هایی صورت گرفته و می‌گیرد تا طرق دیگری نیز برای اندازه گیری میزان ابقای انرژی یافت گردد. در بسیاری از آزمایشات تغذیه‌ای مقادیر مصرف انرژی قابل هضم و یا انرژی قابل متابولیسم به نحو رضایت بخشی اندازه‌گیری می‌شود اما میزان ابقای انرژی در بدن حیوان را تنها از تغییرات وزن زنده آن می توان تخمین زد.

به هر حال تخمینی که بدست می آید بسیار تقریبی است زیرا اولاً این تغییرات احتمالاً مربوط به تغییرات وزن محتویات دستگاه گوارشی یا مثانه می‌شود و ثانیاً انرژی موجود در بافت های بوجود آمده با توجه به نسبت‌های ماهیچه، استخوان و چربی در آن بسیار متغیر خواهد بود.

تنها قسمتی از این اشکالات در زمانی که ابقای انرژی به صورت شیر یا تخم مرغ است و انرژی موجود در آن‌ها به سهولت محاسبه می‌گردد، قابل اجتناب خواهد بود زیرا ابقای انرژی به صورت محصولاتی نظیر شیر و تخم مرغ تقریباً همیشه با ابقای انرژی در سایر بافت‌ها همراه است (برای مثال وزن و انرژی موجود در بافت‌های گاوی که شیر تولید می‌کند همواره به طور طبیعی در حال کاهش و یا افزایش است). به هر حال اگر بتوان مقدار انرژی موجود در حیوان را درابتدا و انتهای آزمایش تخمین زد میزان ابقای انرژی آن نیز تعیین می‌گردد.

روش کالری متری

به منظور مطالعه درباره حدود استفاده حیوان از انرژی قابل متابولیسم غذا لازم است میزان حرارت تولید شده از حیوان یا مقدار انرژی ابقاء شده در بدن ، آن را اندازه‌گیری کرد. مقدار تولید حرارت به وسیله روش‌های فیزیکی مستقیماً قابل اندازه گیری است، برای این کار وسیله ای به نام کالری متر حیوانی لازم است و به عملیات کالری متری مستقیم گفته می‌شود. در عوض اندازه‌گیری مستقیم می‌توان مقدار حرارت را از روی تبادل تنفسی حیوان نیز تخمین زد، در این حالت معمولاً از اتاق تنفسی استفاده شده و روش را کالری متری غیر مستقیم می‌خوانند.

کالری متری مستقیم:

حیوانات جزء برای مدت زمان اندک حرارت ذخیره ننموده و هرگاه زمان اندازه‌گیری ۲۴ ساعت یا بیشتر باشد می‌توان مطمئن بود مقدار حرارتی که حیوان از دست می‌دهد برابر مقدار حرارتی

است که تولید می‌کند. حیوان حرارت را اساساً به صورت تشعشع، هدایت و انتقال از سطح بدن و به وسیله تبخیر آب از پوست و شش‌ها از دست می‌دهد. در این روش حیوان در یک اتاق عایق و بدون منفذ قرار گرفته و به وسیله آن مقدار حرارتی که حیوان از طریق تبخیر آب از دست می‌دهد به کمک اندازه‌گیری حجم هوا و مقدار رطوبت آن در مواقع دخول و خروج از اتاق، تعیین می-گردد. در اکثر کالری مترهای قدیمی، حرارتی را که حیوان از طریق تشعشع، هدایت و انتقال از دست می‌داده به آبی که در درون لوله های مارپیچی داخل اتاق جریان داشت منتقل می‌شد و سپس با محاسبه شدت جریان آب و اختلاف درجه حرارت آن در مواقع دخول و خروج از اتاق، میزان حرارت از دست داده شده را محاسبه می‌نمودند.

با استفاده از انواع جدیدتر کالری متر مقدار حرارت در زمان عبور از دیوار اتاق اندازه‌گیری می‌شود، این اندازه‌گیری به کمک وسایل الکتریکی انجام می‌گیرد ، که مقادیر هر دو صورت اتلاف حرارتی به طور اتوماتیک تعیین می‌گردد.

مقدار اتلاف حرارتی غذای تحت آزمایش را می‌توان به کمک اندازه‌گیری مقادیر حرارتی که حیوان در دو سطح تغذیه از دست می‌دهد، تعیین نمود. اختیار دو سطح تغذیه از این نظر لازم است که بتوان حرارتی را که مربوط به متابولیسم پایه حیوان می‌شود متمایز ساخت. اگر غذایی به تنهایی مورد مطالعه باشد می‌توان آن را به عنوان تنها ماده موجود در جیره در اختیار حیوان قرار داد. در صورتی‌که غذای تحت آزمایش به کیفیتی باشد که نتوان آن را به تنهایی در اختیار دام قرار داد، سطح پایینی تغذیه را جیره پایه‌ای و سطح تغذیه بالایی را همان جیره پایه به اضافه مقداری از غذای مورد آزمایش اختیار نمود. ساختمان کالری متری حیوانی معمولاً پرهزینه است و انواع قدیمی آن نیاز به کار و صرف وقت زیاد دارد، لذا امروزه کالری متری حیوان به طریق غیرمستقیم انجام می‌گیرد.

کالری متری غیرمستقیم:

به طورکلی موادی که در بدن اکسیده می‌شوند و در نتیجه انرژی آن‌ها تبدیل به حرارت می‌گردد، در سه طبقه مواد مغذی؛ کربوهیدراتها، پروتئین‌ها و چربی‌ها جای می‌گیرند. فعل و انفعال کلی اکسیداسیون کربوهیدراتها، نظیر گلوکز به صورت زیر است:

1) $C_6H_{12}O_6 + 6O_2 \longrightarrow 6CO_2 + 6H_2O + 2.82\ MJ$

و اکسیداسیون تری پالمیتین به عنوان نمونه یک چربی:

2) $C_3H_5(OOC.C_{15}H_{31})_3 + 72.5\ O_2 \longrightarrow 51\ CO_2 + 49\ H_2O + 32.02\ MJ$

در شرایط متعارفی یک مولکول گرم در اکسیژن حجمی معادل ۲۲,۴ لیتر را اشغال می‌نماید. بنابراین در حیوانی که تمام انرژی خود را از اکسیداسیون گلوکز تأمین می‌نماید مصرف یک لیتر اکسیژن منجر به تولید (۲۲,۴ ×۶) ۲۰/۹۸ کیلوژول حرارت می‌شود، این مقدار برای مخلوطی از کربوهیدراتها، به صورت میانگین، ۲۱,۱۲ کیلوژول به ازای مصرف هر لیتر اکسیژن است. این مقادیر را ((معادل‌های حرارتی اکسیژن)) می‌خوانند و از آنها در کالری متری غیرمستقیم، برای به دست آوردن تخمینی از مقدار حرارت حاصل مصرف اکسیژن استفاده می‌نمایند.

در حیوانی که انرژی را تنها از سوزاندن مخلوطی از چربی‌ها به دست می‌آورد معادل حرارتی اکسیژن ۱۹,۶۱ کیلوژول به ازای مصرف هر لیتر اکسیژن است. حیوانات در حالت طبیعی انرژی را منحصراً از کربوهیدرات یا چربی به دست نمی‌آورند بلکه مخلوطی از آن‌ها را (به اضافه پروتئین) برای این منظور اکسیده می‌کنند.

بنابراین برای به کار بردن معادل حرارتی مناسب به هنگام تبدیل اکسیژن مصرف شده به حرارت، لازم است بدانیم چه مقداری از اکسیژن برای هر یک از مواد غذایی قابل هضم مصرف می‌شود. این نسبت‌ها را می‌توان با به کار بردن نسبت تنفسی Respiratory quotient محاسبه نمود.

RQ نسبت بین حجم گازکربنیک تولید شده و حجم اکسیژن مصرف شده توسط یک حیوان است. چون در فشار و درجه حرارت یکسان، حجم‌های مساوی از گازها حاوی تعداد مولکول‌های مساوی هستند لذا RQ از روی مولکول‌های گازکربنیکی که تولید می‌شود و اکسیژنی که مصرف می‌گردد قابل محاسبه می‌باشد.

در معادله (۱) RQ برای کربوهبدرات برابر ۱ و در معادله (۲) برای چربی تری پالمیتین ۰,۷ است. اگر RQ برای حیوانی مشخص باشد نسبت‌های چربی و کربوهیدرات اکسیده شده را می‌توان به کمک جداول استاندارد تعیین نمود. برای مثال، RQ برابر ۰,۹ نمایانگر اکسیداسیون مخلوطی مرکب از ۶۷,۵٪ کربوهیدرات و ۳۲,۵٪ چربی است و معادل حرارتی اکسیژن چنین مخلوطی ۲۰,۶۰ کیلوژول به ازای هر لیتر می‌باشد.

مخلوطی که اکسیده می‌شود معمولاً حاوی پروتئین است. مقادیر پروتئین سوخته شده را می‌توان به کمک اندازه‌گیری مقدار ازت ادرار تخمین زد زیرا از کاتابولیسم هر گرم پروتئین، ۰,۱۶ گرم ازت از طریق ادرار دفع می‌گردد. حرارت احتراق پروتئین به طور میانگین ۲۲,۲ کیلوژول به ازای هر گرم پروتئین است. به ازای اکسیداسیون هر گرم پروتئین ۰,۷۷ لیتر CO_2 تولید و ۰,۹۶ لیتر O_2 مصرف می-شود، در نتیجه RQ آن معادل ۰,۸ است.

اندازه‌گیری ابقای انرژی در بدن به وسیله تکنیک (تعادل کربن و ازت)

در کالری متری مستقیم، تولید حرارت تخمین زده شده و میزان ابقاء انرژی از روی اختلاف بین مقدار انرژی قابل متابولیسم مصرفی حیوان و تولید حرارت آن محاسبه می‌شود. در روش تعادی کربن وازت، ابقاء انرژی به طور مستقیم تخمین زده شده و تولید حرارت از طریق اختلاف محاسبه

می‌شود. شکل اصلی ذخیره انرژی در بدن حیوان در حال رشد یا حیوان پرواری، پروتئین و چربی است زیرا ذخایر کربوهیدرات بدن کم و نسبتاً ثابت است.

برای بدست آوردن تخمینی از مقادیر چربی و پروتئینی که ذخیره می‌شود می‌توان از روش تعادل کربن و ازت استفاده نمود. در این روش، اندازه‌گیری تفاوت بین مقادیر این عناصر در مواقع دخول و خروج از بدن مقادیر ابقاء شده را بدست می‌دهد. سپس انرژی ابقاء شده یا به عبارت دیگر حاصل ضرب مقادیر مواد مغذی ذخیره شده در ارزش‌های حرارتی این مواد محاسبه می‌گردد. کربن و ازت منحصراً به وسیله غذا وارد بدن می‌شوند. در حالی‌که ازت تنها از طریق ادرار و مدفوع دفع می‌گردد، کربن به صورت متان و دی‌اکسیدکربن نیز خارج می‌شود و به همین علت اجرای آزمایش تعادل را در اتاق تنفسی را ایجاب می‌نماید.

در این روش مقدار پروتئین ذخیره شده را با ضرب تعادل ازت در ۶,۲۵ محاسبه می‌نمایند زیرا فرض بر این است که پروتئین بدن حاوی ۱۶٪ ازت است. همچنین ۵۱,۲٪ پروتئین را کربن تشکیل می‌دهد، بنابراین مقدار کربنی که به صورت پروتئین در بدن ذخیره می‌شود قابل محاسبه است. مابقی کربن به شکل چربی ذخیره می‌شود، چربی بدن حاوی ۷۴,۶٪ کربن می‌باشد. مقدار ذخیره چربی با ضرب تعادل کربن (پس از کسر مقداری که صرف ذخیره پروتئین شده) در ۷۴,۶ / ۱۰۰ تعیین می‌گردد. سپس، انرژی موجود در ذخائر چربی و پروتئین با استفاده از میانگین ارزش‌های حرارتی بافت‌های بدن محاسبه می‌شود.

این ارزش‌ها بسته به نوع حیوان متغیر است، در حال حاضر برای گاو و گوسفند معمولاً ۳۹,۳ مگاژول به ازای هر کیلوگرم چربی و ۲۳,۶ مگاژول به ازای هر کیلوگرم پروتئین در نظر گرفته می‌شود. عدم نیاز به اندازه‌گیری مصرف اکسیژن (یا RQ) و تقسیم ابقاء انرژی به دو صورت چربی

و پروتئین ذخیره شده از فواید تکنیک تعادل کربن و ازت محسوب می‌شود. در جدول زیر مثالی از نحوه محاسبه انرژی ابقاء شده (و تولید حرارت) طبق این روش آورده شده است.

نتایج آزمایش (در ۲۴ ساعت)	کربن (گرم)	ازت (گرم)	انرژی (مگاژول)
مصرف (مقدار خورده شده)	۶۸۴,۵	۴۱,۶۷	۲۸,۴۱
دفع از طریق مدفوع	۲۷۹,۳	۱۳,۹۶	۱۱,۴۷
دفع از طریق ادرار	۳۳,۶	۲۵,۴۱	۱,۵
دفع از طریق خروج متان	۲۰,۳	-	۱,۴۹
دفع از طریق خروج گازکربنیک	۲۷۸	-	-
تعادل	۷۳,۳	۲,۳	-
مصرف انرژی قابل متابولیسم	-	-	۱۳,۹۵

ذخیره پروتئین و چربی

پروتئین ذخیره شده	۲,۳×۶,۲۵=۱۴,۴
کربنی که به صورت پروتئین ذخیره شده	۱۴,۴×۰,۵۱۲=۷,۴
کربنی که به صورت چربی ذخیره شده	۷۳,۳-۷,۴=۶۵,۹
چربی ذخیره شده	۶۵,۹×۱۰۰ / ۷۴,۶=۸۸,۳

ابقای انرژی و تولید حرارت

انرژی ذخیره شده به صورت پروتئین	۱۴,۴×۲۳,۶=۰,۳۴
انرژی ذخیره شده به صورت چربی	۸۸,۳×۳۹,۳=۳,۴۷
کل انرژی ابقاء شده	۰,۳۴×۳,۴۷=۳,۸۱
تولید حرارت	۱۳,۹۵-۳,۸۱=۱۰,۱۴

روش ذبح مقایسه‌ای

در روش ذبح مقایسه‌ای این تخمین با تقسیم نمودن حیوانات به دو گروه و ذبح یکی از دو گروه در ابتدای آزمایش بدست می‌آید.

انرژی موجود در حیوانات ذبح شده به وسیله بمب کالری متر تعیین می‌گردد، نمونه ها را می‌توان از تمام بدن (که به وسیله دستگاهی کاملاً خرد و مخلوط شده) و یا از بافت‌های مورد نظر تهیه نمود. از این طریق رابطه‌ای بین وزن زنده حیوان و انرژی موجود در آن به دست می‌آید که از آن برای پیش‌گوئی مقدار انرژی اولیه در حیوانات گروه دوم استفاده می‌شود.

حیوانات گروه دوم در پایان آزمایش ذبح و همانند حیوانات گروه اول مقدار انرژی موجود در آن ها تعیین می‌گردد. سپس میزان ابقای انرژی در آن‌ها محاسبه می‌شود.

در جدول مثالی از کاربرد فن‌آوری ذبح مقایسه‌ای نشان داده شده است. در این روش دسته‌ای از خروس‌ها قبل از قرار گرفتن در اتاق‌های تنفسی و دسته دیگر در چهار روز بعد از آن ذبح می‌شوند از روی اختلاف انرژی موجود در بدن خروس‌ها قبل از ذبح و بعد از آن میزان ابقاء انرژی محاسبه می‌شود. کسر میزان ابقاء انرژی از انرژی قابل متابولیسم مصرفی پرنده تخمینی از تولید حرارت است.

تولید حرارت همچنین توسط اتاق تنفسی نیز برآورد می‌گردد. نتایج این دو روش هماهنگ بوده و تنها ۲ درصد تفاوت نشان می‌دهد. اغلب آزمایشات ذبح مقایسه‌ای طولانی مدت بوده و بنابراین تعادل انرژی بیشتری را نسبت به آن چه که در جدول موجود است، نشان می‌دهند.

همچنین بایستی به این نکته توجه کرد که در آزمایشات ذبح مقایسه‌ای اغلب، ابقاء انرژی در مقایسه با روش‌های کالری‌متری کمتر است. علت آن شاید بخاطر فرصت بیشتر حیوان برای دفع انرژی از طریق فعالیت ماهیچه‌ای است.

کاربرد فن‌آوری ذبح مقایسه ای برای تخمین ابقاء انرژی و تولید حرارت در طیور

پرندگان	آغاز آزمایش	پایان آزمایش	اختلاف
وزن زنده (گرم)	۲۷۵۵	۲۸۲۳	۶۸
انرژی خام (کیلو ژول)	۲۷۴۹۱	۲۸۱۷۰	۶۷۹
انرژی قابل متابولیسم مصرفی (کیلو ژول)		۲۲۵۵	
تولید حرارت (کیلو ژول) (۶۷۹ – ۲۲۲۵)		۱۵۷۶	
تولید حرارت در اتاق تنفسی (کیلو ژول)		۱۵۴۸	

روش ذبح مقایسه‌ای به وسایل دقیق و گران قیمت نیازی ندارد. معهذا در هنگامی که حیوانات بزرگ مورد آزمایش باشند صرف وقت و هزینه زیادی در بر خواهد داست. اگر بتوان اندازه‌گیری ترکیبات بدن و تعیین انرژی موجود در آنها را به نحوی انجام داد که عملیات موجب مرگ و یا حداقل غیر قابل استفاده شدن لاشه حیوان نگردد از مخارج آزمایش به مقدار زیاد کاسته خواهد شد.