

CONSIDERENTE PRIVIND DIMENSIONAREA CIRCUITULUI DE CAPTARE A ENERGIEI DIN SOL PENTRU A ASIGURA ENERGIA FUNCȚIONĂRII UNEI POMPE DE CĂLDURĂ

Lucrare aparuta in Buletinul celei de a 26-a Conferință de Instalații, Știința Modernă și Energia, Cluj Napoca, 2007, Universitatea Tehnică din Cluj Napoca, Facultatea de Instalații, Editura Risoprint Cluj Napoca

Proiectarea instalației de pompe de căldură constă din determinarea puterii sursei calde din mediul înconjurător și a puterii necesare de încălzire, și alegerea pompei cu puterea electrică necesară transferului de energie din mediul înconjurător către interiorul locuinței. Se impune alegerea acelei pompei de căldură care să răspundă cel mai bine necesarului de energie (căldură, condiționare, apă caldă) dar și disponibilului de energie din mediu.

Temperatura solului depinde de climat, stratul de zăpadă și pământ, panta în care se amplasează colectori, de proprietățile solului, de anotimpul, altitudinea, latitudinea etc.

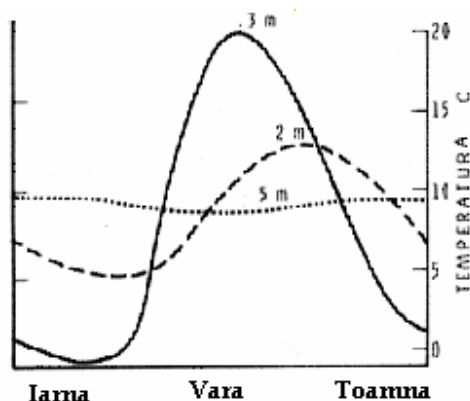


Fig. 1 Temperaturile solului depind de climat, stratul de zăpadă, pantele solului și proprietățile solului.

Graphic: Canadian Building Digest

În funcție de tipul solului și a reliefului unde urmează a se monta pompa de căldură s-a stabilit în tabelul 1. elementele care recomandă folosirea unui tip sau altul de extragere a energiei din sol/apă.

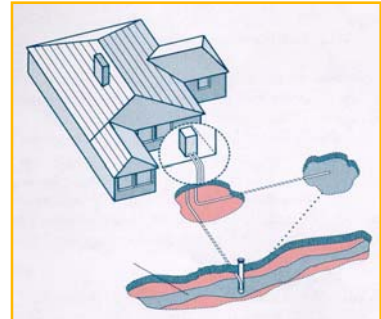
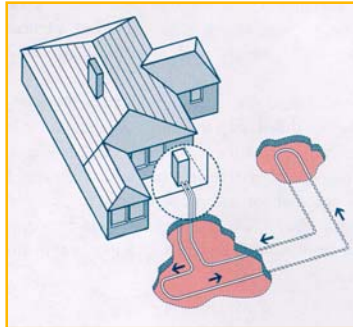
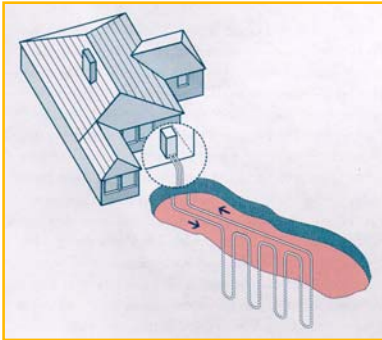
Tabelul 1. Modalități de extragere a căldurii pentru pompa de căldură

Conducte Verticale	Conducte Orizontale	Apă subterană
▶ Teren stâncos	▶ Mai mult teren folosit	▶ Apă din puțuri + Injecție
▶ Mai scump	▶ Mai ieftin	▶ Cel mai ieftin
▶ Puțin teren folosit		

▶ Eficiență ridicată

▶ Clădiri mai mici
▶ Temperatura sursei
variază

▶ Reglementări
▶ Ancrasare



a) Alegerea sursei de căldură

De regulă trebuie folosită sursa de căldură cu nivelul de temperatură cel mai ridicat, Astfel se ating cei mai ridicați indici de eficiență, și respectiv cele mai reduse cheltuieli de exploatare.

- Apă/apă Acest sistem (sistem închis) se alege în cazul în care avem la dispoziție apă freatică la o adâncime și de o calitate optimă, prin care se pot atinge indicii de eficiență maximă.
- Sol/apă. În funcție de mediul purtător de căldură din colectoarele din sol, distingem între agent de lucru/apă și vaporizare directă/apa. Dacă avem la dispoziție o suprafață destul de mare de teren, atunci colectoarele plane sunt cea mai ieftină soluție. Se recomandă în mod special la construcții noi. Dacă avem o suprafață mică de teren la dispoziție se pretează sondele cu agent de lucru pentru folosirea căldurii pământului (sistem închis)
- Aer/apă În cazul în care nu intră în discuție nici solul și nici apa freatică, ca sursă de căldură, este practic posibil oriunde să folosim aerul exterior ca sursă de căldură. Aceasta alternativă este în special la reutilizarea unei construcții existente.

b) Serpentine orizontale

Solul este sursa ideală de căldură pentru instalațiile care lucrează monovalent. Solul acumulează energia solară și se regenerează prin apa de ploaie. Din această cauză și iarna când cade zăpadă există energie la dispoziție.

Instalația de captare a energiei din sol poate fi cu captatori plani, orizontali sau amplasați în sonde, concepute ca sisteme închise. Lichidul transportator de căldură (apă sau un amestec pe bază de apă) este transportat cu ajutorul unei pompe de circulație prin acest sistem. Se folosesc țevi din polietilenă neagră.

Pentru montarea colectoarelor plani și a sondelor este necesar ca solul să fie compact și uniform, pentru a se evita deteriorarea mecanică a acestora. Solul în care se montează trebuie să prezinte o umiditate cât mai ridicată pentru a beneficia de avantajele conductive ale unui sol umectat. La solurile argiloase umede este necesară o suprafață

mai mică pentru extragerea căldurii decât la solurile pietroase, uscate.

Tabelul 2. Energia posibilă a fi extrasă din sol prin montarea serpentinelor orizontale

Calitatea solului	Distanța între colectoare (cm)	Puterea specifică de extragere	Suprafața colectorului mp/KWh		
			B=3	B=3,5	B=4
Uscat, necompactat	50	10 W/mp	66 mp	71 mp	75 mp
Umed, compactat	50	20 – 30 W/mp	33-32 mp	36-24 mp	38-25 mp
Ud, nisip, pietriș	80	40 W/mp	17 mp	18 mp	19 mp

Instalarea colectoarelor se face de regulă în plan orizontal, pe o suprafață netedă sau cu o ușoară înclinație laterală (în pantă). În pantă, țevile colectoare se pun întotdeauna în sens invers pantei, la o adâncime cuprinsă între 1,2 - 1,4 m și se recomandă ca fiecare țevă trasă să aibă aceeași lungime (cca. 100 m) pentru ca diferența de presiune să fie aproape egală (pentru o captare echilibrată a energiei).

Calculul energiei disponibile a mediului cald

$$Q_c = \frac{L(t_g - t_w)}{R}$$

unde:

Q_c – energia disponibilă (W/h)

L – lungimea conductelor (m)

t_g – temperatura pământului (C)

t_w – temperatura fluidului (C)

R – rezistența termică de transfer (m C/W)

c) Colectoare Kunette (în spirală)

Colectoarele spiralate au început a fi folosite deoarece necesită o suprafață mult mai mică de teren în care urmează a fi amplasate pentru a capta energia.

Tabelul 2. Energia posibilă a fi extrasă din sol prin montarea serpentinelor spiralate

Calitatea solului	Puterea specifică de extragere
Uscat, necompactat	50 W/mp
Umed, compactat	100 – 125 W/mp
Ud, nisip, pietriș	150 W/mp

Instalarea colectoarelor se face la adâncimi cuprinse între 1,6 – 2 m față de generatoarea superioară. Se recomandă ca lățimea spiralei să fie de minim 80 cm, lungimea de minim 20 m pentru un circuit, iar distanța între șanțuri de cel puțin 3 m.

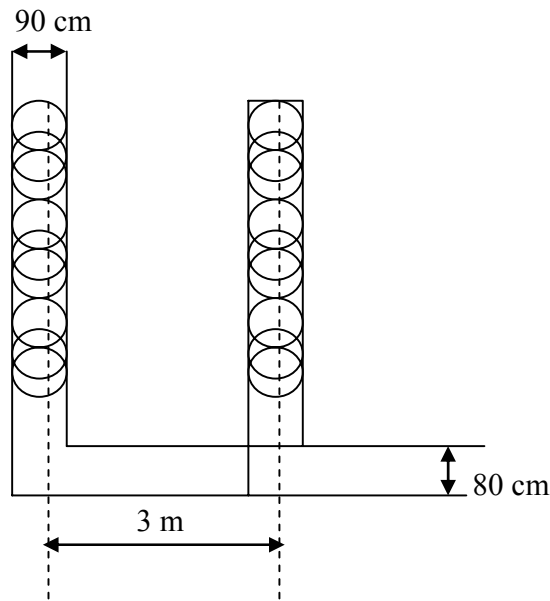


Fig. 2. Dispunerea spiralelor în șături

d) Sonde verticale

Sondele verticale prezintă avantajul reducerii suprafeței ocupate de colectori și posibilitatea captării unei cantități mult mai mari de energie urmare a gradientului termic care crește cu adâncimea (1 °C la 33 m).

Tabelul 3. Energia posibilă a fi extrasă din sol prin montarea serpentinei verticale

Calitatea solului	Puterea specifică de extragere	Suprafața colectorului mp/KWh		
		B=3	B=3,5	B=4
Sedimente uscate	30 W/mp	22 m	24 m	
Ardezie, bazalt	55 W/mp	12 m	13 m	25 m
Piatră densă cu conductibilitate termică ridicată	80 W/mp	8 m	9 m	14 m
Sol cu circulație puternică a apei freatice	100 W/mp	6,5 m	7 m	9,5 m

Adâncimea sondei este limitată doar de caracteristicile de ordin economic, uzual ele fiind de până la 100 m. Distanța între sonde trebuie să fie de cel puțin 5 m.

Volumul agentului (l/h) de lucru pentru captarea energiei calde se calculează cu formula:

$$G = \frac{3600P_{sol}}{C \cdot \Delta t}$$

Unde:

P_{sol} – puterea de extragere a căldurii din sol (kW)

C – căldura specifică a agentului de lucru (KJ/kg K)

Δt - diferența de temperatură (K)

Pentru stabilirea puterii pompei de circulație în circuitul exterior sunt necesare cunoașterea: rezistenței țevii colectoare, rezistența vaporizatorului, rezistența armăturilor (cca. 50mbar), rezistența la îngheț pentru a stabili factorul de corecție în cazul unei vâscozități mai ridicate.

Valorile indicate în tabelele anterioare sunt valori acoperitoare pentru dimensionarea circuitului de captare/cedare a energiei din/în sol. În continuare vom expune și metodele de calcul detaliate pentru captatorul de energie din sol.

e) Variația temperaturii gazelor naturale în conductele din circuitul de captare a energiei din sol

În procesul de dimensionare a sistemului de captare a energiei din sol un rol important îl are cunoașterea fenomenelor ce influențează această activitate.

Variația temperaturii fluidului într-o conductă îngropată se produce sub influența unor caracteristici ale solului, conductei și ale fluidului transportat, după legile termodinamice cunoscute privind schimbul de căldură între două medii.

Cantitatea de căldură Q cedată de fluidul din conductă solului este:

$$Q = K \cdot \Delta t, \text{ unde: (Kcal/h}\cdot\text{m)}$$

K - coeficient de transmitere a căldurii conductă sol (Kcal/h \cdot °C \cdot m);

Δt - diferența de temperatura conductă sol;

$$K = \frac{2\pi\lambda}{\ln \frac{D_e}{D_i}}$$

unde:

D_i = diametrul interior al conductei (cm)

D_e = diametrul exterior (inclusiv al izolației conductei dacă există) (cm)

λ -coeficientul de conductibilitate calorică (Kcal/h \cdot °C \cdot m)

Coeficientul de conductibilitate calorică se stabilește prin măsurători pentru diferite materiale.

Coeficientul λ este influențat de natura solului (nisip, argilă, amestecuri etc) și de umiditate. De aceea este greu de determinat un coeficient unic pentru tot traseul unei conducte și pentru toate anotimpurile.

Pentru a stabili cantitatea de energie care se poate extrage din sol este necesară cunoașterea caracteristicilor solului și calcularea aportului de energie.

Tabelul 4. Proprietățile termice ale unor roci la o temperatură de 25 C

Tip de rocă	% Apariției la suprafața solului	Conductivitatea termică (W/m·K)	Conductivitatea termică (W/m·K) 20% impurități	Căldura specifică (W/kg· K)	Densitatea (kg/mc)	Difuzivitatea termică (mp/zi) $\alpha = \frac{k}{\rho c_p}$
Roci dense	-	3,46	-	840	3200	0,111
Roci medii	-	2,42	-	840	2800	0,089
Beton dens	-	1,73	-	840	2400	0,073
Sol greu, saturat	-	2,42	-	840	3200	0,056
Zidărie solidă	-	1,30	-	880	2290	0,056
Sol greu umed	-	1,30	-	960	2100	0,045
Sol greu uscat	-	0,87	-	840	2000	0,045
Sol afânat, umed	-	0,87	-	1050	1600	0,045
Sol afânat, uscat	-	0,35	-	840	1440	0,024
Roci eruptive						
Granit (10% quartz)	10,4	1,9-5,1	2,3-3,3	879	2640	0,084-0,12
Granit (10% quartz)	10,4	1,9-5,1	2,6-3,6	879	2640	0,093-0,13
Amfibolite		1,9-4,7	2,9-3,8		2800-3129	
Andezit		1,4-4,8	1,9-2,4	502	2560	0,1-0,16
Bazalt	42,8	2,1-2,4		712-	2880	0,065-0,084
				879		
Diorites	11,2	2,1-3,3	2,1-2,9	920	2880	0,065-0,093
Roci sedimentare						
Argilă pietrificată		1,9-2,9				
Claystone						
Dolomită		1,6-6,2	2,8-6,2	879	2720-2800	0,10-0,21
Limestone		1,4-6,2	2,4-3,8	920	2400-2800	0,093-0,13
Rocă de sare		6,4		837	2080-2160	
Pietriș	1,7	2,1-3,5		1005	2560-2720	0,065-0,11
Aleurit (Rocă sedimentară detritică, neconsolidată)		1,4-2,4				
Marnă umedă (25% quarz)	4,2	1,0-4,0	1,7-3,1	879	2080-2640	0,084-0,11
Marnă umedă (fără quarz)	4,2	1,0-4,0	1,0-1,6	879	2080-2640	0,047-0,056
Marnă uscată (25% quarz)	4,2	1,0-4,0	1,4-2,4	879	2080-2640	0,065-0,093
Marnă uscată (fără quarz)	4,2	1,0-4,0	0,9-1,4	879	2080-2640	0,042-0,051
Roci metamorfice						
Rocă metamorfică	21,4	1,7-5,7	2,3-3,5	920	2650-2800	0,084-0,11
Marmură	0,9	2,1-5,5	2,1-3,3	920	2720	0,074-0,11
Cuarz		5,2-6,9		837	2560	0,20-0,28
Șist	5,1	2,1-4,5	2,4-3,8		2720-3200	
Gresie		1,6-2,6		920	2720-2800	0,056-0,084

Umiditatea îmbunătățește conductivitatea oricărui material solid, de aceea identificarea acesteia sub aspectul valorii minime, maxime și medii este importantă în determinarea conductivității termice a solului.

Pentru un element de conductă, cu o lungime dx, ecuația schimbului de căldură conductă-sol va fi:

$$G_0 \cdot \gamma_0 \cdot Cp \cdot dt_x = K \cdot D_i \cdot \pi \cdot dx \cdot (T_x - T_{sol})$$

sau

$$\frac{dt_x}{T_x - T_{sol}} = \frac{k \cdot \pi \cdot D_i}{G_0 \cdot \gamma_0 \cdot Cp} \cdot dx$$

ecuație diferențială din care prin integrare între limitele T_0 și T_x , rezultă în final relația¹:

$$T_x = T_{sol} + \frac{T_0 - T_{sol}}{e^{\left(\frac{K \cdot \pi \cdot D_i \cdot x}{G_0 \cdot \gamma_0 \cdot Cp}\right)}}$$

x-tronsonul de conductă luat în considerare (m)

T_x - temperatura fluidului în conductă la distanța "x" (K)

T_{sol} - temperatura solului la adâncimea de îngropare a conductei (considerând aproximativ constantă pe distanța "x") (K)

T_0 - temperatura inițială a fluidului la intrarea în tronsonul de lungime "x" (K)

K-coeficientul de transmitere a căldurii între conductă și sol (Kcal/h·m²·K)

$$K = \left(\frac{d}{2\lambda_1} \ln \frac{D}{d} + \frac{1}{\alpha_4} \right)^{-1}$$

$$\alpha_4 = \frac{\lambda_2}{d} \left[0.65 + \left(\frac{d}{h_0 + \lambda_2 \left(\frac{1}{\alpha_3} + \frac{\delta}{\lambda_3} \right)} \right)^2 \right]$$

unde:

d-diametrul interior al conductei neizolate termic (m)

α_4 -coeficientul cedării de căldură de la conductă la sol (W/m²·K)

δ -grosimea stratului de zăpadă (m)

λ_2 -coeficientul de conductibilitate termică a solului de terasament. Acesta trebuie determinat în funcție de temperatura solului și regimul de temperaturi al conductei. La temperaturi pozitive ale solului și ale fluidului valoarea coeficientului de conductibilitate termică trebuie adoptată ca pentru solul dezghețat, pentru valori de temperatură negative, valoarea coeficientului de conductibilitate termică trebuie adoptată ca pentru solul înghețat.

λ_3 -coeficientul de conductibilitate termică a stratului de zăpadă depusă pe sol. Se admite adoptarea în funcție de starea zăpezii:

-zăpadă proaspătă căzută - 0,1 W/m K;

-zăpadă bătătorită - 0,35 W/m K;

-zăpadă topită - 0,64 W/m K.

α_3 -coeficientul de cedare a căldurii de la suprafața solului în atmosferă (W/m²·K)

$\alpha_3=6,2+4,2 \cdot V$; V fiind viteza vântului;

h_0 -adâncimea de așezare a axei conductei față de suprafața solului (m)

D_i - diametrul interior al conductei (m)

G_0 - debitul de fluid ce trece prin conductă (m³/h)

γ_0 - greutatea specifică a fluidului (Kgf/m³)

C_p - căldura specifică a fluidului (Kcal/Kg·K)

Experimental s-au determinat următoarele valori ale coeficientului de transmitere a căldurii între conductă și sol:

-sol format din nisip uscat $k=0,0036$ (Kcal/h·m²·K)

-sol format din nisip umed $k=0,0109$ (Kcal/h·m²·K)

-sol format din argilă puțin umedă $K=0,0045$ (Kcal/h·m²·K)

Temperatura medie a fluidului într-o conductă îngropată

Împărțind lungimea unei conducte în "x" elemente și scriind ecuația de debit pentru fiecare element, prin însumarea acestor ecuații se obține o relație de forma:

$$T_m = \frac{1}{L} \int_0^L T_x \cdot dx$$

sau înlocuind în T_x se obține:

$$T_m = \frac{1}{L} \int_0^L T_{sol} \cdot dx + \frac{1}{L} \int_0^L \frac{T_0 - T_{sol}}{e^{\left(\frac{K \cdot \pi \cdot D_i \cdot x}{G_0 \cdot \gamma_0 \cdot Cp}\right)}} dx$$

$$T_m = T_{sol} + (T_0 - T_{sol}) \frac{G_0 \cdot \gamma_0 \cdot Cp}{K \cdot \pi \cdot D_i \cdot L} \left(1 - \frac{1}{e^{\left(\frac{K \cdot \pi \cdot D_i \cdot x}{G_0 \cdot \gamma_0 \cdot Cp}\right)}} \right)$$

e) Calculul hidraulic de dimensionare al colectoarelor

Dimensionarea lungimii colectorului

Pentru a dimensiona lungimea conductei colectoare plecăm de la temperatura necesară a fi colectată din sol, respectiv de la temperatura fluidului la ieșirea din circuitul colectorului.

Astfel, lungimea colectorului este:

$$L = \frac{G_0 \cdot \gamma_0 \cdot Cp}{K \cdot \pi \cdot D_i} \ln \left(\frac{T_0 - T_{sol}}{T_x - T_{sol}} \right)$$

L-lungimea tronsonului de conductă necesar (m)

T_x - temperatura fluidului în conductă la distanța "x" (K)

T_{sol} - temperatura solului la adâncimea de îngropare a conductei (considerând aproximativ constantă pe distanța "x") (K)

T_0 - temperatura inițială a fluidului la intrarea în tronsonul de lungime "x" (K)

K-coeficientul de transmitere a căldurii între conductă și sol (Kcal/h·m²·K)

$$K = \left(\frac{d}{2\lambda_1} \ln \frac{D}{d} + \frac{1}{\alpha_4} \right)^{-1}$$

Dimensionarea diametrului conductelor ce formează colectorul

Calculul hidraulic de dimensionare al conductelor ce formează colectorul se face pe baza ecuației fundamentale a pierderilor de sarcină în conducte:

$$\Delta p = 6,25 \cdot 10^4 \frac{G^2}{\rho d^4} \left(\frac{\lambda L}{d} + \sum \xi \right) \text{ (Pa)}$$

unde:

G – cantitatea de fluid ce trece în unitatea de timp prin conductă (kg/h)

ρ - densitatea fluidului (kg/m³)

d – diametrul interior al conductei (mm)

L – lungimea conductelor (m)

λ - coeficientul de frecare hidraulic

ξ - pierderile de sarcină locale

Calculul de stabilire a diametrelor conductelor se face pe baza planurilor și a schemei de calcul a instalației și constă din următoarele etape:

- se stabilește circuitul de captare a energiei cel mai dezavantajos (în cazul în care există mai multe circuite) în raport cu pompa de circulație. Se consideră circuitul cel mai îndepărtat și cu adâncimea cea mai mare;
- se determină presiunea necesară în acest circuit: $H_1 = h_1 g(\rho_r - \rho_d)$, unde: h – diferența de nivel (m), g – accelerația gravitațională (kg/m s²), ρ_r – densitatea fluidului la intrarea în circuit, ρ_d – densitatea fluidului la ieșirea din circuit.
- se determină pierderea de sarcină liniară ($R = \frac{\lambda}{d}$) pentru circuitul cel mai defavorizat considerat cu formula: $Rm_i = \frac{(1-a)H}{\sum L_i}$ (Pa/m), unde s-au aproximat pierderile de sarcină în rezistențele locale cu formula $\sum Z = aH$, iar a se poate aproxima ca fiind 0,1.
- Se determină diametrele preliminare, din circuitul considerat în funcție de viteza de curgere a fluidului și de necesarul de energie extras din sol, din nomogramele producătorilor de țevă care prezintă pierderile de sarcină unitare.
- Se determină valoarea coeficienților de rezistență locală $\sum \xi$, pe fiecare tronson plecând de la configurația rețelei, în funcție de care se stabilesc pierderile de sarcină Z.
- Se determină pierderile de sarcină pe fiecare tronson din circuitul considerat $\sum (RL + Z)$ și se compară cu presiunea disponibilă H; condiția ca dimensionarea să fie corectă este ca $H \geq \sum (RL + Z)$ (Pa). Dacă nu se realizează condiția se trece la redimensionarea unor tronsoane. Diametrele conductelor trebuie să nu conducă la depășirea vitezelor optime recomandate a fluidului (V=0,5 ... 2,0 m/s).Circuitele trebuie astfel alese încât întreaga rețea să fie echilibrată din punct de vedere hidraulic, în caz contrar fiind necesare modificări în configurația întregii instalații.

BIBLIOGRAFIE

- [1] **Chisăliță, D.**, „*Pompele de căldură – Soluție fezabilă?*”, a 41-a Conferință Națională de Instalații, Instalații pentru începutul Mileniului trei, Creșterea performanței energetice a clădirilor și a instalațiilor aferente, Sinaina, 19-21 octombrie 2006, pag. 138-144, 2006,
- [2] **Sârbu I.**, - *Optimizarea energetica a clădirilor*, Editura MATRIX-ROM, București 2002
- [3] *** OCHSNER, *Manual de operare a pompelor de căldură*, 2003
- [4] *** OCHSNER, *Instrucțiuni de lucru*, 2006
- [5] *** OCHSNER, *Catalog de prezentare a pompelor de căldură*, 2006
- [6] *** *Instalații de ventilare și climatizare*, Editura ARTENCO, Bucuresti, 2003
- [7] www.pompedecaldura2005.ro
- [8] www.ochsner.ro